



Bc. Petr Bartošík

Porovnání obrobitelnosti korozivzdorné oceli DIN 1.4404 vyrobené 3D tiskem a válčováním

Machinability of Stainless Steel DIN 1.4404 Made by 3D Printing and Rolling

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Ostrava 2021

Bibliografický záznam

Autor: Bc. Petr Bartošík

Název práce: Porovnání obrobiteľnosti korozivzdorné oceli DIN 1.4404 vyrobené 3D tiskem a válcováním

Studijní program: N0715A270007 Strojírenská technologie

Vedoucí práce: Ing. Marek Pagáč Ph.D.

Akademický rok: 2020/21

Počet stran: 97

Klíčová slova: Obrobiteľnosť, 3D tisk, aditívna technológia, rezná sila, vibrácie, teplota pri obrábení, parametre drsnosti, tvorba tríske, opotrebenie nástroje

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Markovi Pagáčovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování diplomové práce. Mé poděkování patří též Ing. Jiřímu Hajnýšovi, Ph.D. a Ing. Anetě Slaninkové za spolupráci při získávání údajů pro výzkumnou část práce.

Diplomová práce byla vypracována v rámci projektu: „Specifický výzkum moderních technologií výroby“, reg. č. „SP2021/100“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BARTOŠÍK, P. *Porovnání obrobitelnosti korozivzdorné oceli DIN 1.4404 vyrobené 3D tiskem a válcováním: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2021, 97 s. Vedoucí práce: Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá porovnáním obrobitelnosti korozivzdorné oceli DIN 1.4404 vyrobené dvěma způsoby. První způsob je výroba aditivní technologií – 3D tiskem, druhý způsob je válcování. V úvodní části je rozebrána problematika obrobitelnosti, technologie výroby materiálu, dále pak obráběný materiál, řezný nástroj, CNC obráběcí stroj a jednotlivé měřicí nástroje, které byly pro experiment zvoleny. Experimentální část je zaměřena na porovnávání rozdílů mezi jednotlivými kritérii určujícími obrobitelnost (řezné síly, vibrace, teplota řezání, parametry drsnosti obrobeného povrchu, opotřebení nástroje a tvorba třísky). Porovnávány byly vždy dva vzorky – jeden válcovaný a druhý tištěný, a to při konstantních řezných podmínkách (řezná rychlost – v_c , posuv – f , hloubka třísky – a_p), přičemž byl proveden určitý počet řezů.

ANOTATION OF MASTER THESIS

BARTOŠÍK, P. *Machinability of Stainless Steel DIN 1.4404 Made by 3D Printing and Rolling: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2021, 97 s. Thesis head: Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Master thesis is deals with the comparison of machinability of stainless steel DIN 1.4404 produced in two ways. The first method is the production of additive technology – 3D printing, the second method is rolling. The introductory part discusses the issues of machinability, material production technology, then the machined material, cutting tool, CNC machine and individual measuring tools that were selected for the experiment. The experimental part is focused on comparing the differences between the individual criteria determining machinability (cutting forces, vibrations, cutting temperature, roughness of the machined surface, tool wear and chip formation). Two samples were always compared – one rolled and the other printed, under constant cutting conditions (cutting speed v_c , feed – f , chip depth – a_p), while a certain number of cuts were made.

OBSAH

1	Úvod	10
2	Cíle Práce.....	11
3	Teoretický rozbor problematiky.....	12
3.1	Obrobitelnost	12
2.2.1.	Řezné síly.....	13
2.2.2.	Vibrace	15
2.2.3.	Teplota při obrábění v místě styku materiálu s nástrojem	18
2.2.4.	Parametry drsnosti materiálu	19
2.2.5.	Opotřebení nástroje.....	22
2.2.6.	Tvorba třísky	24
3.2	Technologie výroby materiálu – válcování.....	26
2.2.1.	Válcovací stolice	27
2.2.2.	Válcovací tratě	27
3.3	Technologie výroby materiálu – Aditivní výroba – Technologie SLM	28
3.3.1	Parametry skenování.....	30
3.3.2	Parametry materiálu	32
3.3.3	Parametry stroje	33
4	Návrh experimentu	34
4.1	Vzorky z materiálu DIN 1.4404.....	35
4.1.1	Ocel DIN 1.4404 vyrobená aditivní výrobou	35
4.1.2	Ocel DIN 1.4404 vyrobená válcováním	40
4.2	Zvolený obráběcí stroj a nástroj.....	41
4.2.1	Obráběcí stroj.....	41
4.2.2	Řezný nástroj.....	42
4.3	Měření řezných sil	44
4.3.1	Metodika měření řezných sil	45
4.4	Měření vibrací	47
4.4.1	Metodika měření vibrací	47
4.5	Měření teploty v místě styku řezného nástroje s obrobkem	49
4.5.1	Metodika měření teploty v místě styku řezného nástroje s obrobkem.....	50
4.6	Měření parametrů drsnosti obrobeného povrchu.....	50
4.6.1	Metodika měření parametrů drsnosti obrobeného povrchu	52
4.7	Porovnání opotřebení nástroje	53
4.7.1	Metodika porovnávání opotřebení nástrojů.....	53

4.8	Porovnání tvorby třísky	54
4.8.1	Metodika porovnávání tvorby třísky	54
5	Výsledky experimentu a jejich zhodnocení.....	55
5.1	Porovnání řezných sil společně s opotřebením nástroje	55
5.1.1	Porovnání řezných sil a opotřebení vzorku A se vzorkem D	56
5.1.2	Porovnání řezných sil a opotřebení vzorku B se vzorkem E	61
5.1.3	Porovnání řezných sil a opotřebení vzorku C se vzorkem F	66
5.2	Porovnání vibrací.....	70
5.2.1	Porovnání průběhu vibrací vzorku A se vzorkem D	70
5.2.2	Porovnání průběhu vibrací vzorku B se vzorkem E	71
5.2.3	Porovnání průběhu vibrací vzorku C se vzorkem F	72
5.3	Porovnání teplot v místě styku nástroje s obrobkem	73
5.3.1	Porovnání průběhu teplot vzorku A se vzorkem D	73
5.3.2	Porovnání průběhu teplot vzorku B se vzorkem E	74
5.3.3	Porovnání průběhu teplot vzorku C se vzorkem F	75
5.4	Porovnání parametrů drsnosti	76
5.4.1	Porovnání parametrů drsnosti Ra a Rz (vzorek A se vzorkem D)	76
5.4.2	Porovnání parametru drsnosti Ra a Rz (vzorek B se vzorkem E).....	77
5.4.3	Porovnání parametru drsnosti Ra a Rz (vzorek C se vzorkem F).....	78
5.5	Porovnání tvorby třísky	79
5.5.1	Porovnání tvorby třísky (vzorek A se vzorkem D)	79
5.5.2	Porovnání tvorby třísky (vzorek B se vzorkem E)	81
5.5.3	Porovnání tvorby třísky (vzorek C se vzorkem F)	82
5.6	Porovnání průměrných hodnot jednotlivých faktorů obrobitelnosti.....	84
5.6.1	Řezné síly.....	84
5.6.2	Vibrace	85
5.6.3	Teploty v místě styku nástroje s obrobkem	86
5.6.4	Parametry drsnosti.....	87
5.6.5	Komplexní zhodnocení obrobitelnosti	88
6	Závěr, zhodnocení	93
7	Seznam literatury	95

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK, ZKRATEK A SYMBOLŮ

Značka	Název	Jednotka
A	tažnost	[%]
A_{abs}	absorpce vstupní energie laseru	[-]
AM	Aditivní výroba / Additive Manufacturing	[-]
CAD	počítačem podporované kreslení/ Computer Aided Design	[-]
CNC	počítačem řízený obráběcí stroj/ Computer Numerical Control	[-]
E	hustota energie	[J·mm ⁻²]
EBM	tavení elektronovým paprsek / Electron Beam Melting	[-]
ET	doba expozice laseru na určený bod	[μs]
E_v	efektivní skenovací rychlost laseru	[J·mm ⁻³]
F	síla řezání	[N]
F_c	řezná složka síly	[N]
F_f	posuvová složka síly	[N]
F_p	pasivní složka síly	[N]
HB	tvrdost dle Brinella	[HBW]
I	intenzita laserového paprsku	[J·m ⁻² ·s ⁻¹]
M ²	kvalita paprsku	[-]
OCS	software pro optické ovládání / Optical Control Software	[-]
P	výkon nominální hodnoty laseru	[W]
Q	celkové teplo vzniklé soustružením	[J]
Q_n	teplo vedené nástrojem	[J]
Q_o	teplo vedené obrobkem	[J]
Q_p	teplo vzniklé ve střížné rovině	[J]
Q_{pr}	teplo vedené prostředím	[J]
Q_t	teplo vedené třískou	[J]
Q_{tc}	teplo vzniklé třením čela nástroje a třísky	[J]
Q_{th}	teplo vzniklé třením hřbetu nástroje a obrobené plochy	[J]
R_a	střední aritmetická odchylka profilu	[μm]
R_c	průměrná výška profilu	[μm]
R_{ku}	Špičatost posuzovaného povrchu	[μm]
$R_{mr(c)}$	Materiálový poměr profilu	[μm]
R_p	největší výška výstupku profilu	[μm]
R_q	průměrná kvadratická úchylna posuzovaného profilu	[μm]
R_{sk}	Šikmost posuzovaného profilu	[μm]
R_{sm}	Průměrná šířka prvků profilů	[μm]
R_t	celková výška profilu	[μm]
R_v	největší hloubka prohlubně profilu	[μm]
R_z	největší výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů	[μm]
$R_{\delta c}$	rozdíl výšky úseku profilu	[μm]
$R_{\Delta q}$	průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu	[μm]

RMS	kvadratický průměr výslednice zrychlení vibrací	$[mm \cdot s^{-2}]$
RMS F	výslednice zrychlení vibrací	$[mm \cdot s^{-2}]$
RMS F_c	zrychlení vibrací ve směru řezné složky řezné síly	$[mm \cdot s^{-2}]$
RMS F_f	zrychlení vibrací ve směru posuvové složky řezné síly	$[mm \cdot s^{-2}]$
RMS F_p	zrychlení vibrací ve směru pasivní složky řezné síly	$[mm \cdot s^{-2}]$
SLM	selektivní laserové tavení / Selective Laser Melting	$[-]$
T	teplota předehřátí substrátu	$[^{\circ}C]$
T_c	strojní čas	$[s]$
X_1, Y_1	skenovací posunutí	$[\mu m]$
$Z_{(x)}$	hodnota pořadnice	$[mm]$
a_p	hloubka řezu	$[mm]$
c_p	specifická tepelná kapacita	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
d	průměr laserového paprsku	$[\mu m]$
$d_{v,x}$	průměr částic kovového prášku	$[\mu m]$
f	posuv	$[mm]$
f_p	přechovací faktor prášku	$[-]$
h_{space}	šrafovací vzdálenost	$[mm]$
l_m	délka obrábění	$[mm]$
l_n	vyhodnocovaná délka	$[mm]$
l_r	základní délka	$[mm]$
n	otáčky	$[ot \cdot min^{-1}]$
t	tloušťka vrstvy	$[\mu m]$
v	skenovací rychlost laseru	$[mm \cdot s]$
v_c	řezná rychlost	$[m \cdot min^{-1}]$
x_s	prvek profilu	$[mm]$
α	úhel pootočení	$[^{\circ}]$
ϵ	emise vyzářené laserem	$[-]$
ψ	fázové posunutí	$[rad]$
Θ	kontaktní úhel	$[^{\circ}]$
Λ	vlnová délka laseru	$[nm]$
ρ_{pack}	přechovací hustota	$[%]$
$\Upsilon_{pp}, \Upsilon_{kp}, \Upsilon_{pk}$	povrchová napětí jednotlivých skupenství	$[J \cdot mm^{-2}]$
2D	dvourozměrný / 2-dimension	$[-]$
3D	trojrozměrný / 3-dimension	$[-]$

1 ÚVOD

Trendem současné doby ve strojírenském průmyslu je produkce vysoce kvalitních součástek, přičemž je důraz kladen na hospodárnost výroby. U technologie třískového obrábění, je klíčovou vlastností obrobiteľnost materiálu, což je hlavní aspekt pro volbu vhodných řezných podmínek a pro funkci nástroje při všech metodách obrábění. Kvalita vyrobených součástek se odvíjí od všech faktorů obrobiteľnosti, které jsou závislé na fyzikálních a mechanických vlastnostech obráběného materiálu, metodě obrábění a geometrii nástroje. Obrobiteľnost lze měřit a hodnotit následujícími faktory, kterými jsou řezné síly, vibrace, teploty v místě řezu, parametry drsnosti povrchu, opotřebení nástroje a v neposlední řadě také tvorba třísky. Vyšší řezné síly způsobují větší deformace řezných nástrojů a obrobků, což může způsobovat vibrace a krátkou životnost nástrojů. Vibrace se vyskytují v určité míře při každém procesu obrábění a způsobují opotřebení nástrojů, snižují kvalitu obrobků a poškozují obráběcí stroj. Vysoké teploty mají nepříznivý vliv na životnost řezného nástroje a ovlivňují obráběný povrch. Všechny tyto faktory spolu úzce souvisí a mají vliv na další faktory podle kterých určujeme obrobiteľnost. Pro dosažení hospodárné výroby při obrábění je potřeba zvolit vhodné řezné podmínky, vhodný řezný nástroj vůči obráběnému materiálu a vhodný obráběcí stroj.

Předložená diplomová práce se zabývá porovnáním obrobiteľnosti korozivzdorné oceli DIN 1.4404, vyrobené dvěma odlišnými technologiemi, a to technologií válcováním a technologií aditivní výroby metodou selektivního laserového tavení (SLM). Porovnání obrobiteľnosti bylo uskutečněno na základě šesti aspektů obrobiteľnosti, za daných řezných podmínek, přičemž každé technologii výroby materiálu náležely pro testování tři vzorky. Nejdříve byly změřeny řezné síly, vibrace a teploty během obrábění a následně se po každém řezu měřily parametry drsnosti povrchu a vizuálně se zkoumaly tvary třísek a opotřebení řezného nástroje. Řezné síly byly měřeny a vyhodnocovány ve směru řezné složky, posuvové složky a pasivní složky síly pomocí dynamometru. Vibrace byly měřeny a vyhodnocovány rovněž ve směrech složek řezných sil pomocí akcelerometrů. Teplota při obrábění byla měřena v místě styku nástroje s obrobkem pomocí pyrometru. Parametry drsnosti byly měřeny pomocí dotykového měřicího přístroje. Opotřebení nástroje bylo zkoumáno vizuálně pomocí mikroskopu a tvorba třísky vizuálně.

V teoretické části byla popsána obrobiteľnost a faktory které ji ovlivňují s ohledem na experimentální část práce, tedy řezné síly, vibrace, teploty při obrábění, parametry drsnosti povrchu, opotřebení nástroje a tvorba třísky. Poté byla teoreticky popsána technologie výroby materiálu válcováním. V závěru teoretické části byla popsána aditivní výroba materiálu technologií SLM. Praktická část zahrnuje celý postup měření a vyhodnocování jednotlivých parametrů obrobiteľnosti včetně popisu použitých nástrojů, strojů, obráběných materiálů, použitých softwarů, a měřících zařízení. Poté byly veškeré naměřené hodnoty pečlivě zaznamenány do tabulek. Ve spojnicových grafech pak byly porovnány průběhy jednotlivých hodnot pro dané parametry obrobiteľnosti za určitých řezných podmínek. V grafech sloupcových jsem následně srovnal průměrné hodnoty jednotlivých parametrů obrobiteľnosti pro všechny řezné podmínky. V posledním bodě praktické části je komplexně srovnána obrobiteľnost materiálů pro jednotlivé řezné podmínky.

2 CÍLE PRÁCE

Tato práce vznikla z toho důvodu, že na dané téma ještě není mnoho komplexních výsledků z předešlých výzkumů.

Cíle této práce:

- změřit a porovnat řezné síly,
- změřit a porovnat vibrace,
- změřit a porovnat teploty,
- změřit a porovnat parametry drsnosti povrchu,
- porovnat opotřebení nástrojů,
- porovnat tvorbu třísky,
- porovnat obrobitelnost,
- stanovit optimální řezné podmínky.

3 TEORETICKÝ ROZBOR PROBLEMATIKY

3.1 Obrobitelnost

Obrobitelnost je jednou z nejdůležitějších vlastností materiálu a lze ji obecně vnímat jako míru schopnosti daného obráběného materiálu být zpracován některou z metod obrábění. Je hlavním faktorem ovlivňující volbu řezných podmínek pro správnou funkci nástroje při všech metodách obrábění.

Obrobitelnost je ovlivněna mnoha aspekty, kde nejdůležitější jsou [1]:

- způsob výroby a tepelné zpracování obráběného materiálu,
- fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- chemické složení obráběného materiálu,
- mikrostruktura obráběného materiálu,
- druh a vlastnosti nástrojového materiálu,
- řezná geometrie nástroje,
- metoda obrábění,
- pracovní prostředí.

Zde je důležité vyzdvihnout jednotlivé pojmy s ohledem na experimentální část [24]:

- Způsob výroby – záleží, zda se jedná o materiál vyrobený válcováním nebo aditivní technologií (3D tisk). V jiných případech může jít také o svařenec, odlitek či výkovek. U odlišných způsobů výroby je rozdíl ve struktuře materiálu, v chemickém složení a také ve struktuře povrchové vrstvy.
- Tepelné zpracování – jednotlivé tepelné zpracování mají za následek změnu fyzikálních vlastností, mechanických vlastností a v neposlední řadě i struktury materiálu a povrchové vrstvy.
- Fyzikální a mechanické vlastnosti – jde o pevnost, houževnatost, tvrdost, tvárnost, náchylnost ke zpevňování a tepelnou vodivost. Tyto vlastnosti jsou opět ovlivněny chemickým složením a strukturou materiálu.
- Chemické složení materiálu – souvisí se složením materiálu a obsahem jednotlivých legur, ale také s krystalovou mřížkou daného materiálu.
- Mikrostruktura materiálu – atomární uspořádání krystalové mřížky, mikrostruktura uspořádání a velikosti zrn materiálu
- Řezná geometrie nástroje – ovlivňuje řezné síly, a tudíž i trvanlivost břitů, dále utváření a odvod třísky z místa řezu, směr odchodu třísky a její tvar.
- Metoda obrábění – je ovlivněna obráběnou součástí, podle které se metoda určuje s ohledem na požadovanou přesnost výroby, jakost obrobeného povrchu a nákladů na výrobu. U rotačních součástí volíme soustružení.
- Pracovní prostředí – přívod maziva a chlazení k místu řezu, které ovlivňují trvanlivost břitů nástroje, přesnost rozměrů, jakost obrobené plochy nebo utváření a odvod třísky z místa řezu.

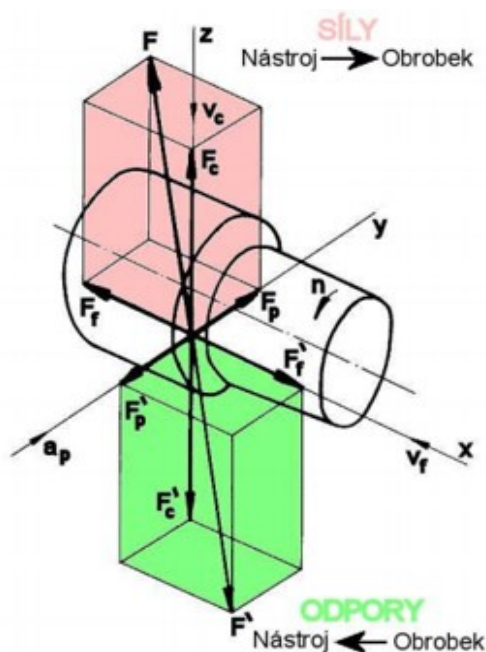
Obrobitelnost je chápána jako relativní vlastnost a určuje se porovnáním dvou odlišných materiálů, obráběných stejným nástrojem za stejných pracovních podmínek. Je to především vlastnost obráběného materiálu, avšak musí být posuzována v úzké souvislosti s řezivostí nástrojového materiálu, používaného pro experiment [1].

Kritéria pro hodnocení obrobitelnosti:

1. velikost řezných sil (odporů),
2. velikost vibrací,
3. teplota řezného procesu,
4. drsnost obrobené plochy,
5. opotřebení nástroje,
6. tvorba třísky.

2.2.1. Řezné síly

Při obrábění vniká břit nástroje velkou silou do obráběného materiálu, přičemž nastává oddělování materiálu ve formě třísek. Při tomto procesu vznikají plastické a elastické deformace a také síly řezání. Síla řezání F se rozkládá do tří na sebe kolmých složek (viz Obr.1) [2]



Obrázek 1 - Schematické znázornění rozložení složek řezných sil a odporů při podélném soustružení [1]

První a nejvýznamnější složkou je řezná složka síly F_c , která působí ve směru hlavního pohybu a vyvolává kroutící moment. Je důležitá pro výpočet namáhání nástroje, upínání nástroje a obrobku, pohonu stroje, výkonu na noži a příkonu elektromotoru obráběcího stroje [3].

Další složkou je posuvová složka síly F_f , která působí ve směru vedlejšího pohybu obrábění, tedy ve směru osy obrobku. Podle její velikosti se dimenzují posuvové mechanismy obráběcího stroje, v potaz se bere i při výpočtu pevnosti nástroje, některých součástí stroje a příkonu potřebného pro posuv nože [5].

Poslední složkou je pasivní složka síly F_p , označována také jako radiální, díky směru jejího působení. Tato složka se snaží vytlačit nástroj mimo záběr s obrobkem. Při obrábění štíhlých součástí může způsobovat chvění v důsledku průhybu obráběného materiálu, což má vliv na přesnost a jakost obrobku, proto je potřebná dostatečná tuhost soustavy [5].

Poměr velikosti jednotlivých složek řezné síly F_c , F_p , F_f , je při běžné práci za normálních řezných podmínek při soustružení středně tvrdých ocelí dán vztahem (2.1):

$$F_c: F_p: F_f = 1: 0,4: 0,25 \quad (2.1)$$

Přičemž je síla řezání rovna odmocnině z kvadratického součtu všech složek podle vztahu (2.2):

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad (2.2)$$

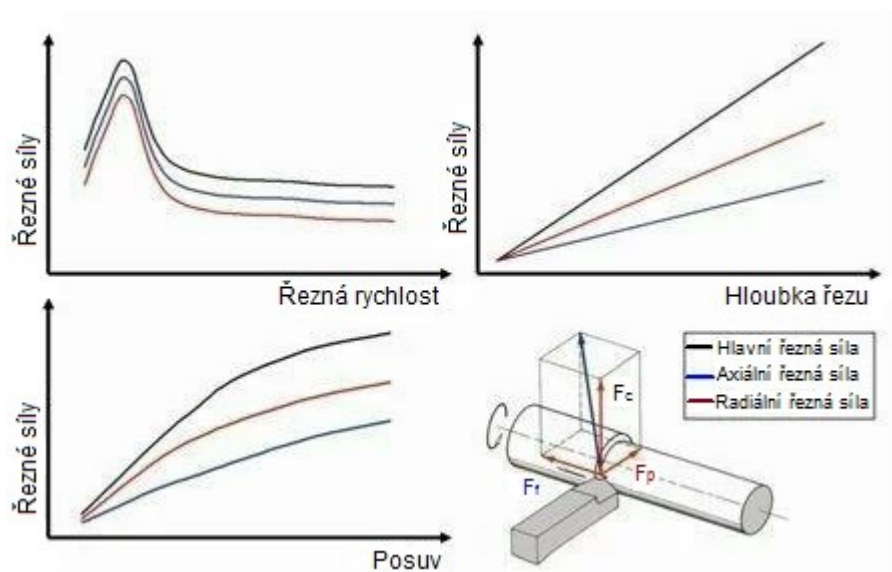
Řezné síly určují a ovlivňují obrobitelnost – jsou jejím limitujícím prvkem. Během procesu řezání ovlivňují spotřebu energie. Větší síly řezání způsobují větší deformace řezných nástrojů i obrobků, což může mít za následek vznik vibrací a deformaci obrobku a zároveň se s většími řeznými silami zpravidla zkracuje životnost nástroje. Proto se klade velký důraz na nalezení správných pracovních podmínek, které vedou k maximálnímu výkonu při co nejnižších nákladech [2]. Pokud chceme ovlivnit řezné síly, musíme nalézt nejideálnější řezné podmínky.

Faktory ovlivňující velikost řezných sil [1]:

- řezné podmínky:
 - řezná rychlost – v_c ,
 - posuv – f ,
 - hloubka řezu – a_p ,
- materiál obrobku,
- geometrie nástroje,
- opotřebení nástroje,
- řezné prostředí,
- tuhost soustavy SNO.

Kienzle uvádí

- Pokud je řezná rychlost zvolena ve správném rozmezí, je vliv řezné rychlosti na řezné síly prakticky zanedbatelný.
- Vliv hloubky řezu na řezné síly je důležitý a má lineární charakter. Každá změna hloubky řezu se projeví stejnou změnou řezných sil.
- Vliv posuvu na řezné síly je důležitý, avšak méně než lineární. Větší posuvy způsobí větší řezné síly, ne však ve stejné výši [2].



Obrázek 2 - Kienzleho princip – grafy závislosti řezných podmínek na jednotlivých složkách řezných sil [2]

2.2.2. Vibrace

Vibrace (kmity) jsou nežádoucím jevem a provázejí téměř každý obráběcí proces včetně soustružení. Negativně ovlivňují kvalitu obrobeneho povrchu a okolního pracovního prostředí, a také opotřebení stroje a nástroje. Obráběcí soustava (stroj-nástroj-obrobek) má složité dynamické charakteristiky. Kmity jsou souborem impulsů a sil působících na soustavu a dělí se na [20]:

- vlastní kmitání,
- vynucené kmitání,
- samobuzené kmitání.

Vlastní kmitání

Vlastní nebo také volné kmitání vzniká kmity vyvolanými vlastní frekvencí. Může být způsobeno rázem – zapnutím spojky nebo záběrem nástroje. Tento typ kmitů je způsoben pružnými silami, které se vlivem odporů ztlumí. V praxi se vyskytují velmi málo a jejich vliv lze obvykle zanedbat [20].

Vynucené kmitání

Takový typ kmitů vzniká, pokud je soustava vychýlena a udržována v kmitání vnitřními nebo vnějšími budícími silami. Většinou se tedy uvažuje, že pokud na obráběcí soustavu působí periodicky proměnlivá budící síla obvykle shodná s frekvencí této síly, vzniká vynucené kmitání, které může být u obráběcí soustavy trojího druhu [21]:

- kmitání, které nevzniká řezným procesem, ale vzniká v technologické soustavě vlivem:
 - rotace nesymetrických součástí,
 - nevyváženosti rotujících součástí,
 - nepřesností převodových mechanismů stroje,
 - setrvačných sil, vzniklých vratným rotačním nebo přímočarým pohybem součástí,

- kmitání vyvolané řezným procesem:
 - proměnlivá hloubka řezu,
 - přerušovaný řez,
- kmitání, přenášené do technologické soustavy z okolí.

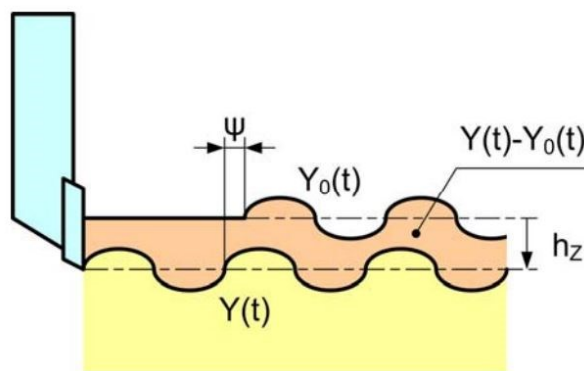
Samobuzené kmitání

Vzájemné ovlivňování řezného procesu a obráběcí soustavy způsobuje samobuzené kmitání. Vznik tohoto kmitání je způsoben přítomností proměnné statické složky řezné síly, která je zajištěna proměnným průřezem třísky. To je dáno vzájemnou změnou polohy nástroje a obrobku vlivem kmitání celé obráběcí soustavy. Klasickým příkladem je překročení určité mezní hodnoty, kterou je mezní axiální hloubka třísky a_p , kde náhle vzniká samobuzené kmitání, které je nežádoucí, jelikož dochází k rychlému nárůstu amplitudy kmitání a může dojít k poškození obráběcího stroje. Samobuzené kmitání rozdělujeme podle principu jeho vzniku na [22]:

- regenerativní princip,
- princip polohové vazby.

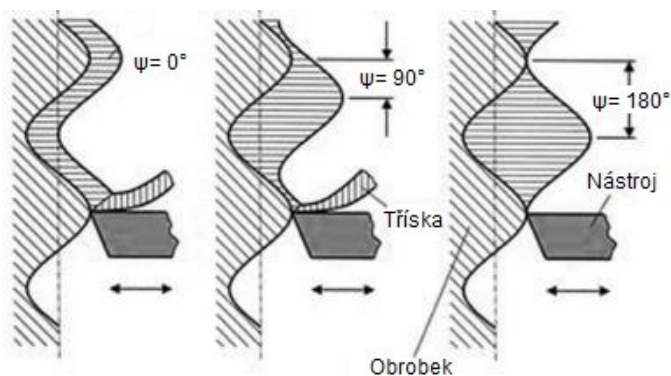
Regenerativní princip kmitání

Tento princip popisuje skutečnost, že tříška je odstraňována z povrchu, který vytváří nástroj již při předchozím řezu a pokud mezi nástrojem a obrobkem nastane kmitání, nástroj vytváří na obrobku zvlněný povrch $Y_0(t)$. Při dalším řezu se vlivem zvlnění povrchu periodicky mění hloubka řezu $Y(t)$ a závisle na ní i řezná síla (viz Obr.3) [21].



Obrázek 3 - Regenerativní princip kmitání [22]

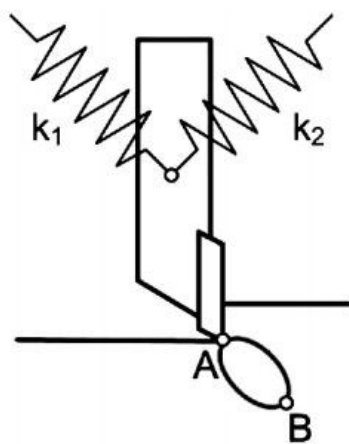
Následkem tohoto periodického jevu je kmitání, které dosahuje větších hodnot než při předchozím řezu. Tento povrch je opět zvlněný a zvlnění se regeneruje při každém dalším řezu. V takovém případě lze pozorovat fázový posun zvlnění (viz Obr. 4), který je rozhodující pro vznik regenerativního kmitání. Maximálního regenerativního kmitání je dosaženo, pokud se fázový posun blíží hodnotě $\pi/2$, naopak pokud je roven nule, regenerativní kmitání se neobjevuje [21].



Obrázek 4 - Schéma možného fázového posunu [23]

Princip polohové vazby

Jde o mechanismus, u kterého vznikají samobuzené kmity vlivem existence dvou dominantních tvarů kmitů mezi nástrojem a obrobkem, které jsou vzájemně kolmé a mají různé vlastní frekvence. Tyto kmity způsobují pohyb břitu po eliptické dráze (viz Obr. 4), jelikož periodická řezná síla rozkmitá systém současně v obou směrech tvarů stejnou frekvencí s konstantní vzájemnou fází. Uvažujeme-li, že se břit pohybuje po eliptické dráze podle obr. 4, ve směru hodinových ručiček z bodu A do bodu B, řezná síla působí proti směru pohybu a tím odebírá energii ze systému. Poté při pohybu z bodu B do bodu A je energie řeznou silou do systému dodávána. Při tomto pohybu (z bodu B do bodu A) je nástroj ve větší hloubce tudíž zde působí větší řezná síla, převažuje energie do systému dodávaná. Tato energie je spotřebovávána tlumením. Při přebytku energie dochází k translačnímu nárůstu amplitudy kmitů a řezný proces se stává nestabilním. Tímto způsobem může dojít ke vzniku samobuzeného kmitání i při obrábění nepochvňeného povrchu. [22]



Obrázek 5 - Princip polohové vazby [21]

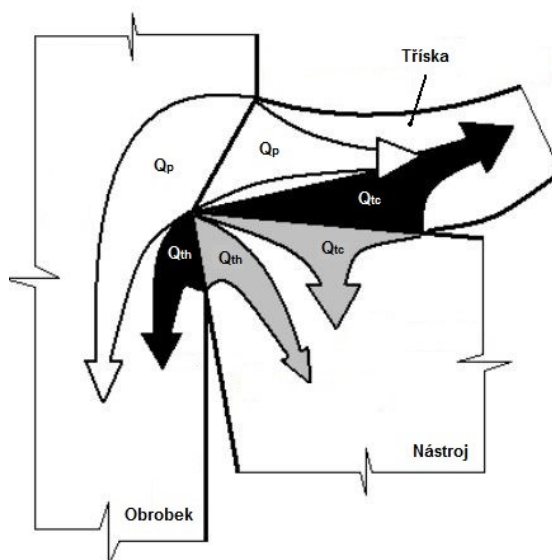
Faktory ovlivňující velikost vibrací [21]:

- materiál obrobku,
- posuv – f ,
- řezná rychlost – v_c ,
- hloubka řezu – a_p ,
- geometrie nástroje.

2.2.3. Teplota při obrábění v místě styku materiálu s nástrojem

V místě řezu je břit nástroje vtlačován do obrobku, který je deformován z části trvale a z části pružně. V rovině stříhu po sobě kloužou odebírané třísky a tento proces je doprovázen značným třením. Odebíraná tříska odchází po čele nástroje, a kromě tření zde vzniká trvalá deformace. Třením hřbetu nástroje o obrobek vznikají pružné deformace. Mechanická práce při procesu řezání se přeměňuje na teplo. Trvalé a pružné deformace jsou doprovázeny vznikem určitého množství tepla v zóně řezání (viz obr. 6) [35]:

- v oblasti primární plastické deformace (střížná rovina) – Q_p ,
- na styčné ploše čela – Q_{tc} ,
- na styčné ploše hřbetu – Q_{th} .



Obrázek 6 - Šíření tepla v zóně řezání [35]

Teplo je při soustružení odváděno:

- třískou – Q_t ,
- nástrojem – Q_n ,
- obrobkem – Q_o ,
- okolím – Q_{pr} .

Na podíl jednotlivých složek odváděného tepla mají vliv řezné podmínky, mechanické vlastnosti a tepelná vodivost obrobku a nástroje, řezné prostředí (způsob chlazení a mazání), a geometrie břitu nástroje. Při zvýšení řezné rychlosti je větší množství tepla odváděno třískou, což sníží množství tepla odváděného obrobkem. Z hlediska řezného nástroje je důležitá geometrie břitu, jelikož ostřejší hrana lépe odřezává materiál a méně jej deformuje, čímž se vytváří méně tepla. U materiálu obrobku je důležitá jeho tvrdost. Čím tvrdší je materiál obrobku tím více odolává deformaci a během soustružení tak vzniká více tepla [35].

Teplo, které vstupuje do nástroje ohřívá břit a ovlivňuje jeho mechanické vlastnosti. Proto se v současnosti pro výrobu nástrojů využívá slinutých karbidů a keramických materiálů, které mají i s rostoucí teplotou dobré řezné vlastnosti. Vzniklé teplo značně ovlivňuje řezný proces, jelikož ovlivňuje [35]:

- řezné vlastnosti nástroje,
- mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- přechování a zpevňování obráběného materiálu,
- podmínky tření na čele a hřbetě nástroje.

Celkové množství tepla vzniklého během soustružení lze vypočítat podle vztahu (2.3)

$$Q = F_c \cdot v_c = Q_t + Q_n + Q_o + Q_{pr} \quad [J] \quad (2.3)$$

kde Q je celkové teplo $[J]$, F_c je řezná složka síly $[N]$ a v_c je řezná rychlost $[m \cdot min^{-1}]$.

2.2.4. Parametry drsnosti materiálu

Norma ČSN EN ISO 4287 popisuje termíny, definice a parametry povrchu. Tato norma určuje drsnost jako souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, která nevyhnutelně vzniká při výrobě nebo v jejím důsledku. Pod pojem drsnost nespádají vady, které nevznikly při obrábění (praskliny, rýhy, póry, aj.) [33]

Na obrobeném povrchu, můžeme indikovat mikronerovnosti, což je drsnost povrchu podle výše uvedené normy, kterou na povrchu zanechává řezný nástroj. Dále na povrchu můžeme zjistit makronerovnosti (vlnitost materiálu), které jsou obvykle způsobeny vibracemi soustavy obrábění. Na obrobeném povrchu dochází ke sdružování těchto nerovností a je důležité odfiltrovat drsnost od vlnitosti povrchu [30].

Parametr drsnosti obrobené plochy je závislý na mnoha faktorech, mezi které řadíme [30]:

- Způsob obrábění
- Obráběný materiál – mechanické a fyzikální vlastnosti, způsob upnutí
- Nástroj – tvar, jakost, geometrie bříty, opotřebení
- Řezné podmínky – velikost posuvu, řezná rychlost, hloubka řezu
- Tuhost soustavy obrábění
- Řezná kapalina
- Tření nástroje nebo třísky o obrobený materiál

Rozdělení parametrů profilu povrchu:

Parametry profilu povrchu jsou rozděleny do tří skupin na parametry výškové, délkové a hybridní. Pro hodnocení struktury povrchu se používají normalizované parametry dle výše uvedené normy ČSN EN ISO 4287, která definuje tyto geometrické parametry [29]:

- P-parametr – nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami z nefiltrovaného profilu povrchu uvnitř měřené délky l_n ,
- R-parametr – svislá vzdálenost mezi nejvyšší špičkou a nejhlubší rýhou filtrovaného profilu drsnosti uvnitř měřené délky l_n ,
- W-parametr – vzdálenost mezi nejvyšším a nejhlubším bodem vyrovnaného profilu vlnitosti uvnitř měřené délky l_n .

Základní termíny pro parametry drsnosti:

Skutečný profil – povrch oddělující těleso od okolního prostředí.

Profil povrchu – profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu a roviny kolmé k rovině rovnoběžné se skutečným povrchem.

Hodnota pořadnice – $Z(x)$ – výška posuzovaného profilu v libovolné poloze.

Prvek profilu – x_s – výstupek a přilehlá prohlubeň profilu.

Základní délka – l_r – délka ve směru osy X, používaná pro rozpoznání nerovností charakterizující vyhodnocovaný profil (viz obr. 7).



Obrázek 7 - Základní délka [29]

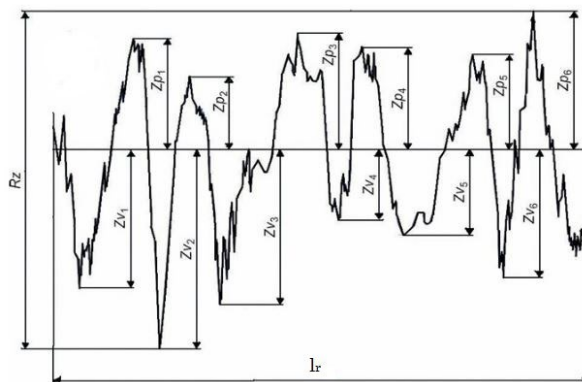
Vyhodnocovaná délka – l_n – délka ve směru osy X, používaná pro posouzení vyhodnocovaného profilu [29].

Hlavní parametry drsnosti:

Největší výška výstupku profilu – R_p – největší délka výstupku profilu Z_p (vzdálenost mezi střední čarou a nejvyšším bodem výstupku) v rozsahu základní délky l_r (viz Obr. 8).

Největší hloubka prohlubně profilu – R_v – největší délka prohlubně profilu Z_v (vzdálenost mezi střední čarou a nejnižším bodem prohlubně profilu) v rozsahu základní délky l_r (viz Obr. 8).

Největší výška profilu – R_z – součet nejvyššího výstupku Z_p a nejnižší prohlubně Z_v v rozsahu základní délky l_r (viz Obr. 8) [29].

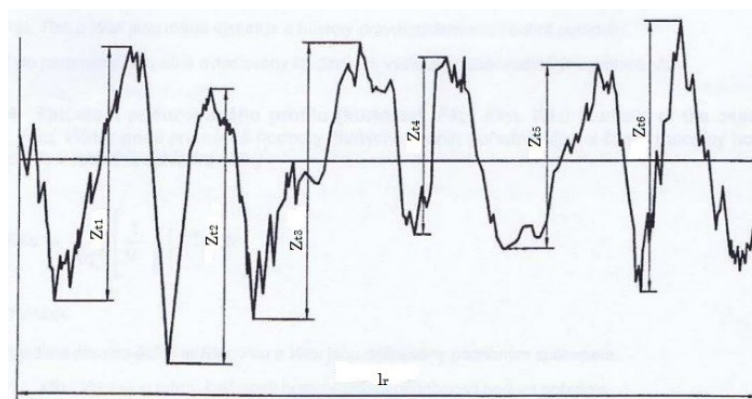


Obrázek 8 – Největší výška profilu R_z – součet nejvyššího výstupku a nejnižší prohlubně [29]

Výška nerovnosti z deseti bodů – R_z – střední hodnota z absolutních hodnot výšek pěti nejvyšších výstupků a hloubek pěti nejnižších prohlubní profilu v rozsahu základní délky l_r . Parametr

výšky nerovnosti z deseti bodů Rz již není uveden v normách, ale stále se používá pro vyhodnocování drsnosti povrchu.

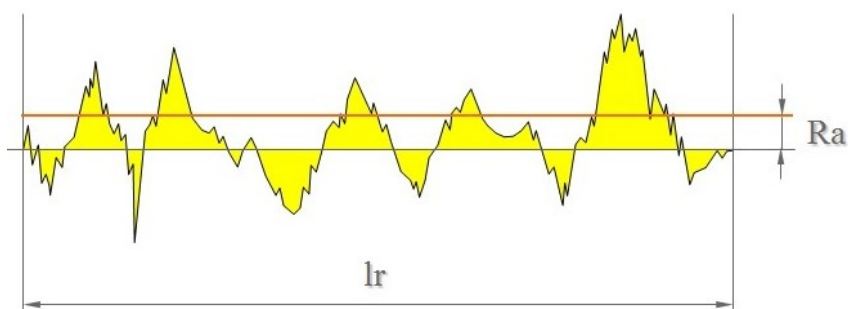
Průměrná výška profilu – Rc – průměrná výška prvků profilu Z_t (součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu) v rozsahu základní délky l_r . Na Obr. 9 je znázorněna výška prvků Z_t v rozsahu základní délky l_r [29].



Obrázek 9 - Výška prvků profilu Z_t [29]

Celková výška profilu – Rt – součet nejvyššího výstupku profilu Z_p a nejnižší prohlubně profilu Z_v v rozsahu vyhodnocované délky l_n .

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu – Ra – aritmetický průměr absolutních hodnot všech pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r (viz Obr. 10) [29].



Obrázek 10 - Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [30]

Úchylka Ra se stanoví dle rovnice (2.5)

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (2.5)$$

Ra je výškový parametr, udávající střední hodnotu vzdáleností zkoumaného povrchu od střední čáry daného profilu. Tento parametr je nejpoužívanějším pro hodnocení drsnosti povrchu i přes fakt, že se jedná o statistickou hodnotu a hodnocení povrchu nemusí být vždy efektivní (dva povrchy se shodným Ra nemusí mít stejný tvar profilu povrchu, proto mohou mít odlišné vlastnosti) [29].

Ostatní parametry drsnosti:

Důležité parametry pro tento experiment byly vyjmenovány a popsány v předchozí kapitole, další parametry nebyly potřeba podrobně popisovat. Těmito parametry jsou [29]:

- Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu – Rq ,
- Šikmost posuzovaného profilu – Rsk ,
- Špičatost posuzovaného povrchu – Rku ,
- Průměrná šířka prvků profilů – RSm ,
- Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu – $R\Delta q$,
- Materiálový poměr profilu – $Rmr(c)$,
- Rozdíl výšky úseku profilu – $R\delta c$

2.2.5. Opotřebení nástroje

Soustružení je doprovázeno vznikem velkého množství tepla na ploše čela a hřbetu nástroje. Materiál břitu je tak namáhán značným tepelným zatížením. Společně s procesem tvorby třísky se vytváří čistý kovový povrch při vysokém tlaku a teplotě. Tento povrch má sklon k chemickým reakcím nebo difuzním procesům. Ve většině obráběných materiálů se vyskytují tvrdé částice různého druhu, které často dosahují tvrdosti materiálu břitu nástroje. Tím může docházet k abrazivnímu efektu [25].

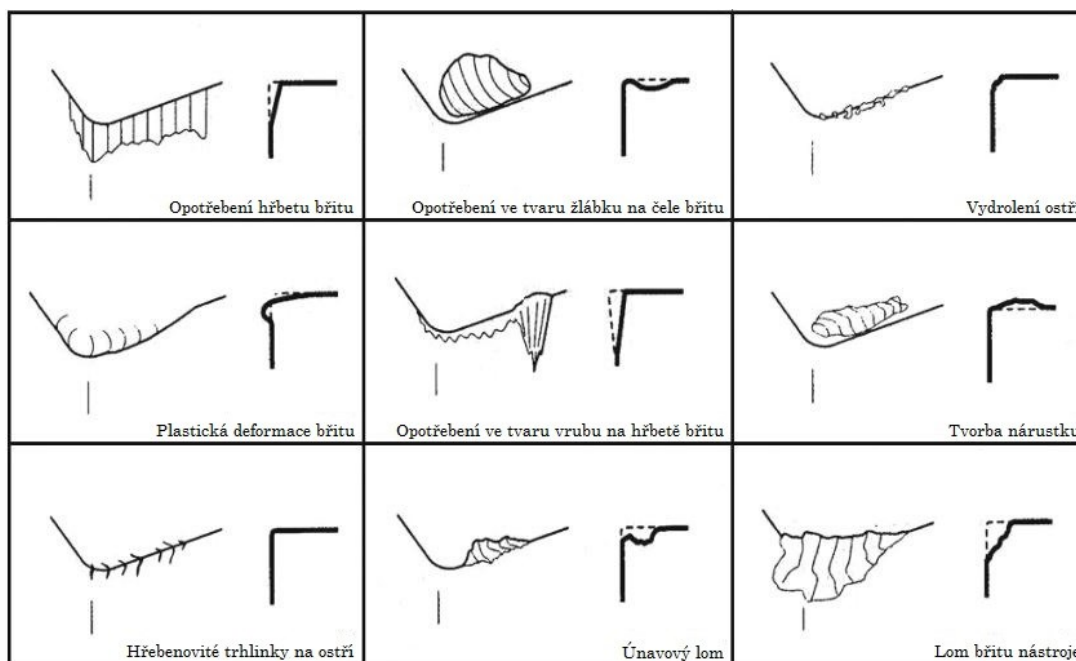
Na břit nástroj tak působí souhrn tepelných, mechanických, chemických a abrazivních faktorů, přičemž dochází ke složitému zatěžování břitu nástroje. V tomto důsledku se projevuje opotřebení nástroje. Rozeznáváme několik mechanismů opotřebení, mezi které patří [26]:

- abraze – mechanické obrušování vlivem tření tvrdých mikročástic obráběného materiálu nebo mikročástic uvolněných z nástroje (fyzikální mechanismus),
- adheze – vytrhávání částic břitu nástroje v důsledku vzniku mikrosvarových (adhezních) spojů mezi nástrojem a obráběným materiálem (fyzikální mechanismus),
- difúze – přemísťování atomů z obráběného do nástrojového materiálu (chemický mechanismus),
- oxidace – vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje vlivem přítomnosti kyslíku v okolním prostředí (chemický mechanismus),
- plastická deformace – náhlá deformace nástroje vlivem velkého tepelného společně s mechanickým zatížením,
- křehký lom – náhlá deformace nástroje vlivem velkého mechanického zatížení.

Čelo nástroje se opotřebovává adhezí, difuzí, abrazí a oxidací, zatímco hřbet převážně abrazí a oxidací. Dalšími faktory, které mají výrazný vliv na opotřebení nástroje, jsou třeba řezné podmínky, geometrie nástroje nebo druh operace (hrubování, dokončování). Tyto faktory rovněž určují, zda se bude nástroj více opotřebovávat na čele nebo hřbetu nástroje [26].

Druhy opotřebení:

Je důležité rozeznávat a klasifikovat typy opotřebení břitu nástroje. Při kontrole břitu po zvětšení např. na mikroskopu, můžeme posoudit jaké opotřebení je na něm viditelné. Tímto způsobem můžeme kontrolovat spolehlivost trvanlivosti nástroje a případně ji dokonce i prodlužovat. Důležité podmínky pro optimální průběh opotřebení jsou správně zvolený nástroj vůči obráběnému materiálu (ideálně dobré jakosti), správné řezné podmínky obrábění, vlastní zkušenost nebo kvalifikovaná odborná pomoc při volbě jednotlivých kritérií řezného procesu. Podle citace [27] firmy Sandvik Coromant rozeznáváme následující typy opotřebení, podle Obr. 11.



Obrázek 11 - Typy opotřebení [27]

Tyto typy opotřebení jsou nejčastější a lze je zařadit do příčin rychlejšího vzniku lomu destičky. Je důležité tomuto jevu včas zabránit. Při pochopení mechanismu opotřebení a analyzování typů opotřebení lze dosáhnout správné volby podmínek obrábění, geometrií břitů a správných nástrojových materiálů vůči materiálům obrobků. To vede k vyváženému opotřebení nástroje, což obecně zajišťuje optimální trvanlivost, bezpečnost, spolehlivost a opakovatelnou přesnost nástroje. Opotřebení břitu obráběcího nástroje lze určovat dle normy ISO 3685 [35].

2.2.6. Tvorba třísky

Jak již bylo uvedeno výše (bod 2.1.3.), při vnikání břitu nástroje do obráběného materiálu dochází v oblasti tvorby třísky k deformacím pružným a následně plastickým. Deformace se rozkládají do obrobku a do nástroje. Pružným deformacím podléhá celý objem obráběného materiálu, zatímco plastickým pouze zóna řezání [1].

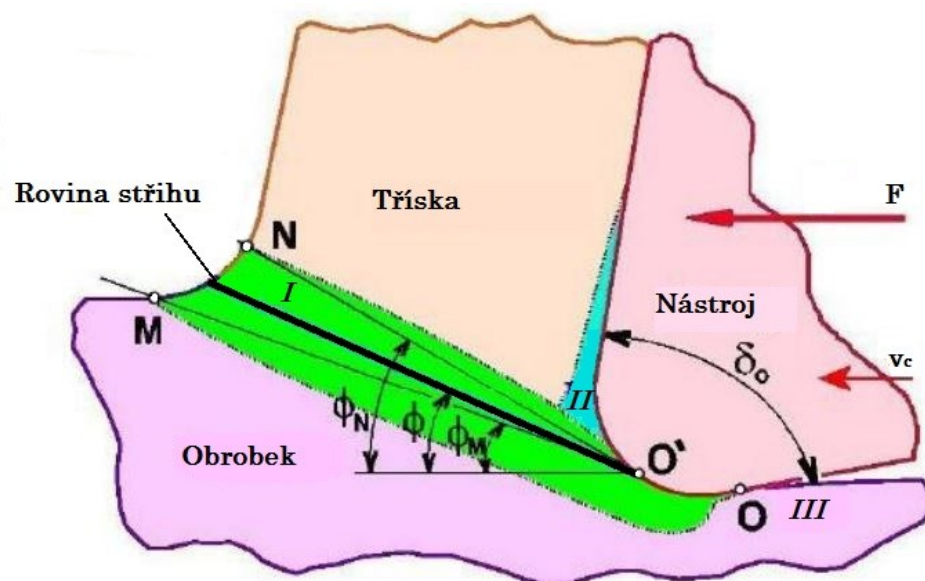
Smykové napětí se kumuluje, než dojde k plastické deformaci obrobku před břittem nástroje. Pohybem nástroje se plastická deformace zvětšuje a dochází k pěchování a posunu vrstev materiálu v kolmém směru vůči kluzným rovinám. Opakovaným oddělováním materiálu ve formě třísek se ukončuje proces plastické deformace, aby znovu došlo ke smykovému napětí a celý proces se opakoval [35].

Oblasti deformace:

Pružné a plastické deformace vznikají v těchto oblastech podle Obr. 12:

- v oblasti primární plastické deformace, která je vymezena body $OMNO'$ a značí se I ,
- v oblasti sekundární plastické deformace, která se značí II ,
- v oblasti terciální plastické deformace, která se značí III .

Stav napjatosti, velikost a tvar oblasti primární plastické deformace $OMNO'$ se odvíjí od fyzikálních vlastností obráběného materiálu, zejména od jeho deformační a zpevňovací schopnosti. Záleží však i na dalších faktorech. Například při zvětšování řezné, ale především posuvové rychlosti se oblast primární plastické deformace zužuje. Dalšími důležitými aspekty jsou řezné prostředí nebo geometrie řezného nástroje. Čím větší je nástrojový úhel čela γ_n , tím menší klade nástroj odpor proti odchodu třísky a tříska je tak méně deformována. Zvětšením pracovního úhlu nastavení κ_{re} do určité hodnoty můžeme docílit zmenšení šířky třísky, což má za následek pokles velikosti koeficientu pěchování třísky. Je důležité všechny tyto zákonitosti brát v potaz pro volbu optimálních řezných podmínek [1].



Obrázek 12 - Oblasti plastických deformací [35]

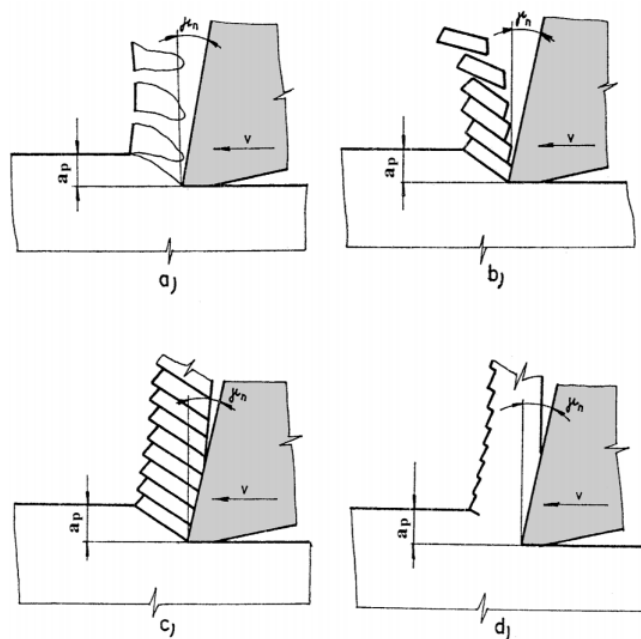
Při procesu řezání vzniká plastická deformace obráběného materiálu, která způsobuje [35]:

- oddělení třísky od obrobku v oblasti I,
- tepelné a mechanické zatížení nástroje,
- opotřebení nástroje na čele v oblasti II a na hřbetě v oblasti III,
- změna struktury materiálu a vznik zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobeného materiálu,
- změna struktury materiálu a přechování třísky.

Tvar třísky:

Třísku lze definovat jako deformovanou odřezávanou vrstvu obráběného materiálu. Při procesu řezání se třísky nejprve utvářejí a následně oddělují ve formě trhané nebo stříhané. Při oddělování trhaných třísek se předpokládá, že tečné napětí τ je nižší než normálové napětí σ . Trhaná, též drobná třísky obvykle vzniká při obrábění tvrdých, křehkých materiálů, a to vylamováním jednotlivých elementů nepravidelných tvarů (obr. 13 a). V případě že tečné napětí τ je vyšší než normálové napětí σ , vzniká stříhaná třísky, která může být [35]:

- plynulá – jednotlivé elementy mají dobrou soudržnost – tvárné materiály (obr. 13 d),
- stupňovitá – jednotlivé, spolu spojené elementy – tvrdé materiály (obr. 13 c),
- elementová – jednotlivé postupně odstříhnuté elementy (obr. 13 b).



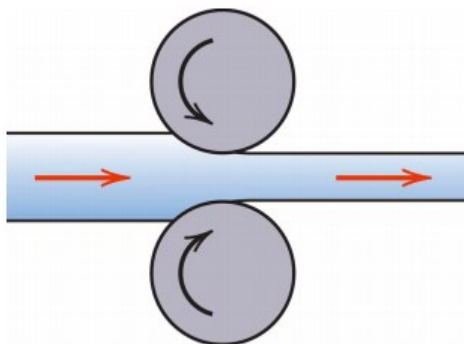
Obrázek 13 - Základní tvary trhaných a stříhaných třísek [35]

Nejdůležitějšími faktory při vzniku třísky s ohledem na její tvar jsou [35]:

- materiál obráběného materiálu a jeho vlastnosti (obrobitelnost),
- materiál nástroje,
- geometrie nástroje a tvar břitu (nástrojový úhel čela γ_n , utvařeče třísek, aj.),
- řezné podmínky (řezná rychlost v_c , posuv f a hloubka řezu a_p).

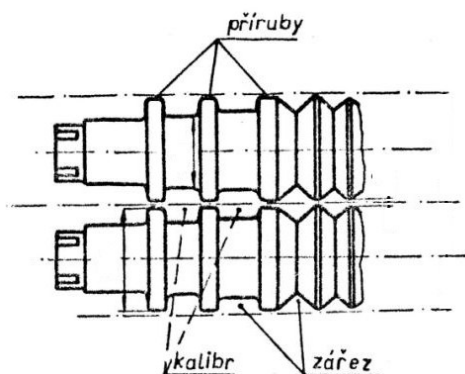
3.2 Technologie výroby materiálu – válcování

Technologie válcování je výrobní technologií objemového tváření, při které opakovaně dochází mezi dvěma nebo více rotujícími válci ke kontinuální plastické deformaci tvářeného materiálu (viz Obr.14). Tvářený materiál je přitom vystaven převážně tlakové napjatosti, s největší složkou ve směru přetvářecí síly. Předpokládá se zde platnost zákona zachování stálého objemu tvářeného materiálu, kde dochází k hlavní deformaci ve směru průměru a vedlejší ve směru délky. Technologii válcování dělíme podle tvářecích teplot na válcování za studena a válcování za tepla. [32]



Obrázek 14 – Princip válcování

Jednotlivé typy produktů se válcují na odlišných válcovacích stolicích (odlišné typy válců). Tvarové vývalky, kterými jsou i tyčové oceli jsou válcovány na kalibrovaných válcích které jsou opatřeny speciálně provedenými zářezy, jež svým tvarem odpovídají požadovaným tvarům vývalků viz (Obr. 15) Válcování pomocí kalibrů se vyznačuje výraznou nerovnoměrnou deformací [34].



Obrázek 15 - Kalibrované válce pro výrobu tvarových vývalků [34]

Válcování tyčové oceli

Jedná se o válcování za tepla. Při válcování tyčové oceli jsou nejčastěji používaným vstupním materiálem válcované nebo plynule lité bloky a sochory. Jak je již výše uvedeno, kruhové tyče se válcují v kalibrovaných válcích. Kruhová ocel se válcuje na hrubých, středních nebo jemných válcovacích tratích, podle požadovaného průřezu. Válcovaný průřez je omezen typem, konstrukcí a uspořádáním válcovacích stolic, podle nichž je volen optimální typ kalibrace. Optimální kalibrační řady pro kruhové vývalky jsou buď ovál – kruh, nebo ovál – pěchovací ovál – kruh [34].

Druhy válcování [32]:

- podélné – válcovaný materiál prochází kolmo k osám válců,
- příčné – válcovaný materiál prochází rovnoběžně s osami válců,
- kosé – válcovaný materiál prochází válci s mimoběžnými osami.

2.2.1. Válcovací stolice

Válcování se uskutečňuje na válcovacích stolicích. Tyto stolice jsou vybaveny pracovními válci, které mohou být ploché nebo kalibrované. Zařízení pro výrobu vývalků – válcovací tratě pro válcování oceli lze rozdělit dle [34]:

- konstrukce válcovacích stolic a počtů válců,
- uspořádání válcovacích stolic,
- způsobu otáčení válců,
- průměru pracovních válců,
- druhu vývalků.

Rozdělení válcovacích stolic [32]:

- jednosměrná stolice – vále se otáčí pouze v jednom směru, jednodušší pohon,
- reverzní stolice – směr otáčení válců se po každém průchodu mění, vyšší požadavky na pohon,
- dvouválcové stolice (dua) – dva vodorovně uložené válce,
- tříválcová stolice (tria) – tři vodorovně uložené válce, možnost použití více kalibrů než u stolic duo,
- čtyřválcové stolice (kvarta) – čtyři válce vodorovně uložené, dva větší pracovní a dva menší opěrné, možnost užití větších válcovacích sil,
- mnohoválcové stolice – šest, sedm, dvanáct nebo dvacet válců, pouze dva nejmenší pracovní, ostatní opěrné,
- univerzální stolice – kromě vodorovných válců i válce uložené svisle.

2.2.2. Válcovací tratě

V současnosti se k válcování tyčí za tepla používají především spojité válcovací tratě, které jsou podle pořadí rozdělena na předválcovací, střední a hotovní. Jednotlivé stolice jsou řazeny za sebou a jejich vzdálenost je kratší než délka materiálu, aby byl válcovaný materiál současně zpracován ve více stolicích a dosahovalo se vyšší produktivity výroby. Z toho důvodu jsou vysoké požadavky na synchronizaci válcovacích rychlostí jednotlivých stolic. Válcovací tratě se dělí podle uspořádání válcovacích stolic [32]:

- Válcovací tratě s jednou stolicí,
- Válcovací tratě s pracovními stolicemi v ose,
- Válcovací tratě průběžné,
- Válcovací tratě polospojité,
- Válcovací tratě spojité.

Rozdělení válcovacích tratí podle velikosti vývalku a průměru pracovních válců [32]:

- Blokové tratě
 - Bloomingy – válcování nejtěžších ingotů na bloky a tlusté předvalky (válce stolic o $\varnothing 1000\text{--}1350\text{mm}$),
- Hrubé tratě – válcování tyčí o velkých průměrech (válce stolic o $\varnothing 650\text{--}900\text{mm}$),
- Střední tratě – válcování středních průměrů tyčí (válce stolic o $\varnothing 400\text{--}600\text{mm}$),
- Jemné tratě – válcování malých průměrů tyčí (válce stolic o $\varnothing 250\text{--}400\text{mm}$).

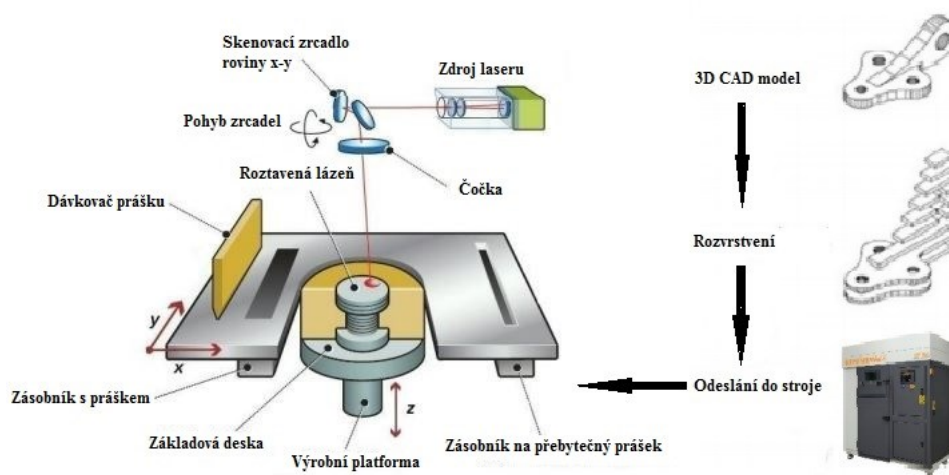
3.3 Technologie výroby materiálu – Aдитivní výroba – Technologie SLM

Aдитivní výroba AM (Additive Manufacturing) technologií SLM (Selective Laser Melting) je jednou z technologií kovového 3D tisku. Dle normy ISO/ASTM 52900:2015 (Additive Manufacturing – General Principles – Terminology) spadá do výrobního procesu – Spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion). Zde působí tepelná energie přivedena přes speciální zrcadla laserovým paprskem, která spéká práškový kov vrstvu po vrstvě. Proces probíhá v komoře s ochrannou atmosférou inertních plynů jako je argon nebo dusík. Tímto způsobem lze tavit oceli, chrom, titan, měď, hliník, kobalt, platinu nebo wolfram [7].

Spékání práškových vrstev je jednou z nejvyspělejších a nejoblíbenějších aditivních technologií pro výrobu kovových součástí. Při tomto procesu je nanosená vrstva prášku na loži opakovaně vystavena vysokému hustotnímu tepelnému toku, který je vyvolán laserem. Následkem je spékání nebo úplné roztavení prášku, který se po zchladnutí spojí do celistvé struktury. Postupná tvorba vrstev končí vytvořením požadované součástky. Zbytkový prášek je po dokončení procesu vysypán do prosévacího zařízení, kde je oddělen od natavených částic a poté znovu použit.

Tato metoda je založena na selektivním tavení práškového lože pomocí fokusovaného laserového paprsku [8]. Kvalitu vyrobené součástky ovlivňuje řada aspektů, kde významným faktorem je skenovací cesta (skenovací vektor). Dalšími faktory ovlivňující kvalitu jsou použitý práškový materiál, výrobní stroj (tiskárna) a další parametry ovlivňující proces tisku [9]. Pro výrobu kovových součástí existuje konkurenční technologie EBM (Electron Beam Melting), která využívá k roztavení materiálu elektronový paprsek a proces probíhá ve vakuové komoře [10].

Princip selektivního laserového tavení tkví ve skenování práškového pole dle CAD souboru, který je rozdělen do několika vrstev. Vysoká intenzita laserového paprsku se stará o roztavení a následné spojení kovového prášku. V první řadě je nutné vytvoření 3D modelu pomocí libovolného CAD softwaru (například Autodesk Inventor). V dalším softwaru (například Autodesk Netfabb) je tento model rozdělen na jednotlivé 2D vrstvy. Každá jednotlivá 2D vrstva znamená jedno nanesení vrstvy kovového prášku. Takový CAD soubor je připraven a odeslán do 3D tiskárny viz Obr. 14.



Obrázek 16 - Schematický popis metody SLM a postup návrhu dílce [7]

Požadovaná součást je tištěna na předehřátý substrát s chemickým složením podobným práškovému kovu. Po natavení vrstvy na výrobní platformě se substrát sníží o výšku vrstvy, dávkovač (recoater – wiper nebo čepel) rozhrne prášek a laser selektivně nataví další vrstvu. Tento postup se opakuje, dokud není vytvořena požadovaná součást. Prášek není mechanicky stlačován, avšak při rozhrnutí lze sledovat typické Gaussovo jednosložkové rozdělení s faktorem f_p 40-60 % [11].

Jak již bylo výše zmíněno, tento proces probíhá v inertní atmosféře z důvodu omezení oxidace a kontaminace z vnější atmosféry, což by mohlo mít za následek selhání stavby součásti. Nejpoužívanějším inertním plynem pro naplnění stavební komory je argon, který snižuje koncentraci kyslíku pod hranici 0,1 % aniž by bylo vytvořeno vakuum. Inertní plyn proudí přes substrát s práškem a odvádí tak neustále zbytkový kyslík, aby nedocházelo ke vztlaku a tvorbě oxidačních defektů. Díky proudícímu plynu je navíc z tavné lázně odváděn nežádoucí spečený materiál, vzniklý pracovní nestabilitou [12]. V publikaci dle Tolochko a kol. [13] je uvedeno, že je prakticky nemožné odstranit veškerý vzduch uvíznutý mezi póry v práškovém loži. V důsledku tohoto efektu je negativně ovlivněna absorpce laseru práškem.

Dle publikace [14] existuje kolem stovky parametrů, které ovlivňují proces stavby materiálu, jelikož technologii SLM provází mnoho vzájemných fyzikálních, mechanických a tepelných jevů. Tyto parametry můžeme rozdělit do tří skupin:

- parametry skenování – voleny operátorem,
- parametry materiálu – závislé na volbě materiálu a prášku,
- parametry stroje – závislé na typu tiskárny.

3.3.1 Parametry skenování

Parametry skenování jsou parametry volené operátorem, patří do nich tyto parametry uvedené v Tab. 1:

Tabulka 1 - Parametry skenování volené operátorem

Parametr	Značka	Jednotka
Výkon laseru	P	W
Skenovací rychlost	v	mm·s ⁻¹
Tloušťka jedné 2D vrstvy	t	μm
Šrafovací vzdálenost (mezi dvěma vektory)	h _{space}	μm
Úhel pootočení mezi jednotlivými vrstvami	α	°
Skenovací posunutí mezi vrstvami ve směru X a Y	X ₁ , Y ₁	μm
Skenovací strategie	-	-
Předehřátí substrátu	T	°C

Výkon laseru a skenovací rychlost

Výkon laseru jde ruku v ruce se skenovací rychlostí. Pokud zvýšíme výkon laseru, můžeme dosáhnout vyšších rychlostí tavení a zároveň většího průniku tepla do hloubky. Pokud zvyšujeme rychlost skenování, zkracujeme dobu ohřevu, čímž zmenšíme rozptýlení tepla do krajů mimo oblast ohřívání taveniny. Tato interakce se označuje jako hustota vyzářené energie. Využívají se různé zdroje laseru, avšak nejrozšířenějšími jsou konvenční systémy využívající modulovaný impulsní nebo kontinuální laserový tok, který určuje dobu expozice, což určuje, kolik je potřeba vyzářit energie. Doba expozice a bodová vzdálenost se označuje jako „efektivní skenovací rychlost laseru“ v. Při určení hustoty vyzářené energie se obecně vychází ze vztahu (2.4), který vychází z kombinace běžných parametrů:

$$E_v = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} [J \cdot mm^{-3}], \quad (2.4)$$

kde P je výkon laseru [kW], h je šrafovací vzdálenost [mm] a t je tloušťka vrstvy [mm] [15].

V publikaci [16] je uveden vztah (2.5), kde se vychází z velikosti průměru laserového paprsku:

$$E = \frac{P}{v \cdot d} [J \cdot mm^{-2}], \quad (2.5)$$

kde P je výkon laseru [W], v je skenovací rychlost [mm⁻²] a d je průměr laserového paprsku [mm].

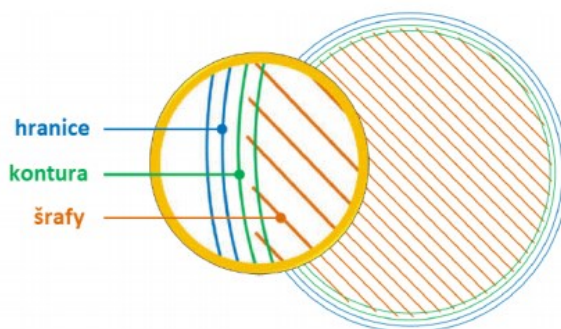
Tyto vztahy jasně ukazují, že hustota přiváděné energie se zvyšuje s vyšším výkonem laseru, při snížení skenovací rychlosti nebo průměru laserového paprsku. Tyto vztahy jsou však zjednodušené a ignorují procesní parametry a podmínky. Pro pulsní laserový tok je výpočet rychlosti skenování možný podle vztahu (2.6):

$$v = \frac{60}{ET+12} \cdot 10^{-3} [mm \cdot s^{-1}], \quad (2.6)$$

kde v je efektivní skenovací rychlost [$mm \cdot s^{-1}$] a ET je doba expozice jednoho pulsu paprsku [μm] [17].

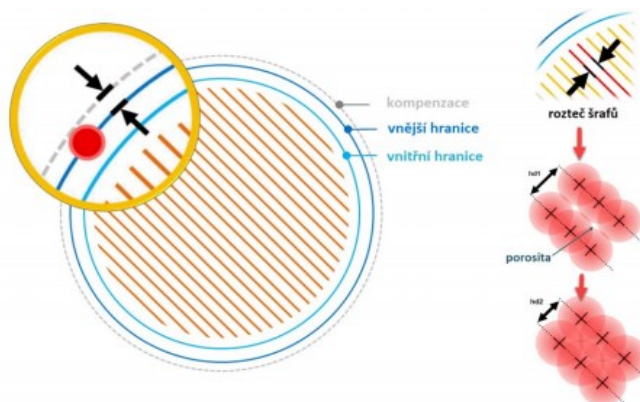
Skenovací strategie

Skenovací strategie je způsob, kterým jsou skenovací vektory nanášeny v jednotlivých 2D vrstvách a mají předem naprogramované vektorové dráhy. Při metodě SLM se vektorové dráhy dělí na hranici, konturu a šrafy (viz Obr. 15).



Obrázek 17 - Vektorové dráhy skenovací strategie [18]

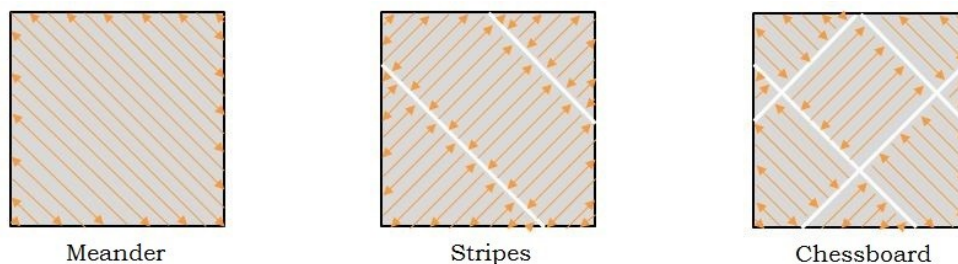
Hranice skenované součásti je odsazena od vnější kontury o poloměr laserového paprsku r_d jako kompenzace (viz Obr. 16), z důvodu dosažení požadovaných rozměrů součásti nebo zlepšení kvality povrchu nespečených zón skenovaných pomocí šrafování. Šrafováním je tvořen největší objem materiálu a skládá se z několika sousedních vektorů, které mají určenou společnou vzdálenost. Vzdálenost mezi šrafy h_d určuje velikost úrovně porosity a úroveň drsnosti povrchu, ale také dobu stavby a přehřívání v oblastech, nebo jiné problémy, proto je důležité najít ideální rozteč šrafů pro požadovanou kvalitu součásti. [14]



Obrázek 18 – Kompenzace (vpravo) rozteč šrafů (vpravo) [18]

Šrafování je prováděno různými strategiemi skenování. Jednotlivé strategie jsou ovlivněny odlišnými tepelnými vztahy, což má za následek odlišné vlastnosti materiálu, mikrostruktury porosity apod. Strategie skenování se také podílí na ovlivnění zbytkových napětí, proto může být upravena ve prospěch kvality materiálu. Nejběžněji používané strategie jsou na Obr. 17. Meander: rovnoběžné vektory; Stripes: rovnoběžné vektory rozdělené do pruhů; Chessboard: šachovnice, vektory kolmé vůči sousednímu poli. Strategie skenování může být mezi jednotlivými vrstvami pootočena nebo posunuta, kvůli zamezení vzniku pórovitosti. Ideální úhel

pootočení α je podle společnosti Renishaw 67°, díky faktu že stejný úhel se opakuje až po 180-ti vrstvách [7].



Obrázek 19 - Nejpoužívanější skenovací strategie metody SLM [18]

3.3.2 Parametry materiálu

Proces SLM ovlivňuje velké množství tepelných, chemických a mechanických jevů, které doprovází výrobu, avšak z velké části je kvalita konečného dílu ovlivněna i vlastnostmi použitého kovového prášku. Nejdůležitějšími parametry jsou tvar, velikost a distribuce částic. Důležitými faktory jsou zde pýchovací hustota a tekutost prášku, kde je pro dosažení nejlepších hodnot vhodné použití sférického tvaru prášku. Pro vytvoření vrstvy s maximální pýchovací hustotou je doporučena dvouvrcholová distribuce prášku v poměru 1:7. Jak u jednotlivých parametrů skenování i zde je nutné volit kompromis, jelikož velký rozsah velikostí částic prášku vede k vyšší pýchovací hustotě, přičemž menší rozsah vede k lepší tekutosti. [7] Další důležité veličiny a faktory jako jsou přenos a absorpce tepla nebo tvorba tavné lázně jsou uvedeny a vysvětleny v Tab. 2.

Tabulka 2 - Přehled hlavních parametrů kovového prášku

Parametr	Značení	Jednotka	Popis
Tvar částice	-	-	Určuje pýchovací hustotu a tekutost
Velikost částice	$d_{v,x}$	μm	Průměr částice
Velikost distribuce částic	-	-	Určuje pýchovací hustotu a tekutost
Pýchovací hustota	ρ_{pack}	%	Znamená množství vzduchu zachyceného v celém objemu prášku
Absorpce	A_{abs}	-	Množství vstupní energie, pohlcené materiálem
Tepelná difuze	α	$m^2 \cdot s^{-1}$	Rychlost příjmu a vedení tepla materiálem
Tepelná vodivost	$K (T)$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Poměr vzdálenosti a teploty při průtoku tepla materiálem
Specifická tepelná kapacita	c_p	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Energie potřebná ke zvýšení teploty o 1K na 1kg prášku při konstantním tlaku
Konvekční koeficient	h	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Tok tepla na jednotku plochy a na teplotní rozdíl mezi pevným a kapalným stavem
Emise	ϵ	-	Množství vyzářené energie ve srovnání s vyzářenou energií z ideálně černého tělesa
Kontaktní úhel	θ	°	Určuje smáčivost tavné lázně
Povrchové napětí	$\gamma_{pp}, \gamma_{kp}, \gamma_{pk}$	$J \cdot m^{-2}$	Určuje tvar tavné lázně

3.3.3 Parametry stroje

Pod pojmem strojní parametry jsou zahrnuty všechny parametry, které jsou specifické pro vybraný stroj a jeho hardware. Jedná se zde hlavně o laserový zdroj, který dokáže přenášet velké množství tepelné energie na jeden určitý bod [19]. Kromě parametrů laseru se jedná i o složení ochranné atmosféry, jelikož materiál může v kapalném stavu reagovat s určitými prvky v atmosféře. Jedním z aspektů je i teplota uvnitř komory (teplota prášku, substrátu, inertního plynu) [7]. Hlavní parametry stroje jsou uvedené v Tab 3.

Tabulka 3 – Hlavní parametry stroje

Parametr	Značení	Jednotka
Výkon laseru	P	W
Průměr laserového paprsku	d	μm
Vlnová délka	λ	nm
Intenzita laserového záření	I	J·m ⁻² ·s ⁻¹
Kvalita paprsku	M ²	-
Režim kontinuální nebo pulsní	-	-
Teplota uvnitř komory	T	°C

4 NÁVRH EXPERIMENTU

Tato kapitola popisuje metodiku měření, materiál, stroje, nástroje a měřící zařízení použité pro tento experiment. Výsledky jednotlivých parametrů byly rozepsány do následující kapitoly včetně jejich porovnání a zhodnocení.

Celý experiment probíhal v prostorách VŠB – TU Ostrava, konkrétně pod záštitou katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie, která disponuje rozvinutou infrastrukturou jak v oblasti obrábění, tak v oblasti aditivní výroby.

Experimentální část se zabývá porovnáním obrobiteľnosti korozivzdorné oceli DIN 1.4404 vyrobené dvěma rozdílnými technologiemi, a to aditivní výrobou a válcováním. Z hlediska obrobiteľnosti byly sledovány a hodnoceny následující parametry:

- řezné síly,
- vibrace,
- teploty v místě styku nástroje a obrobku,
- parametry drsnosti,
- opotřebení nástroje,
- tvorba třísky.

Obrábění probíhalo podle schémata 1 za daných řezných rychlostí a posuvů, přitom za konstantní hloubky $a_p = 2 \text{ mm}$ a bez použití procesní kapaliny (chlazení). Řezné podmínky byly voleny podle doporučení výrobce.

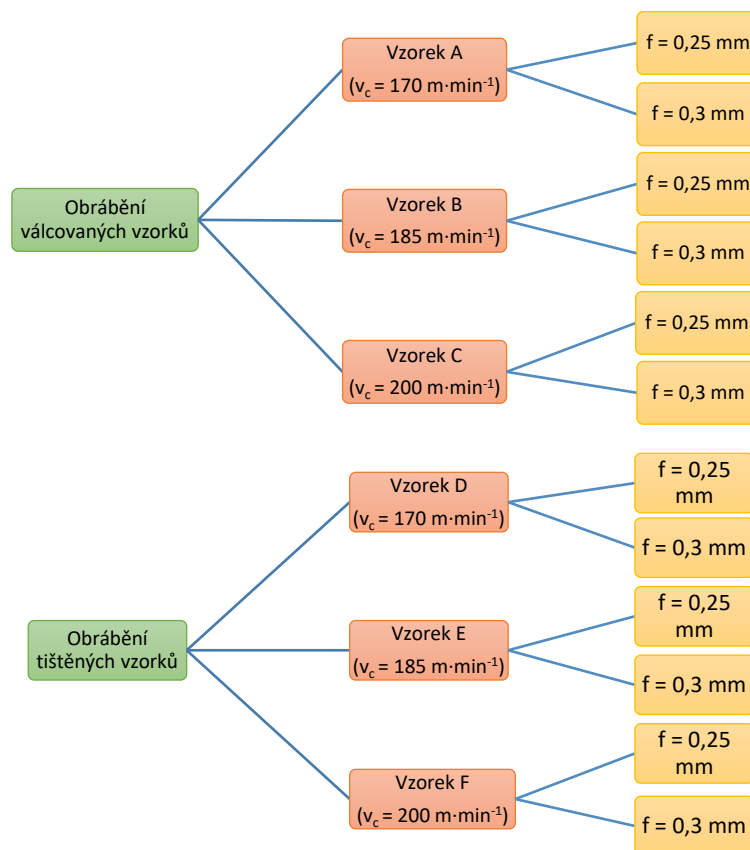


Schéma 1 - Řezné podmínky při obrábění korozivzdorné oceli DIN 1.4404 vyrobené odlišnými technologiemi

4.1 Vzorky z materiálu DIN 1.4404

Označení oceli dle norem:

- AISI: 316L
- DIN: 1.4404 - X2 CrNiMo17-12-2
- ČSN: 17 349

Pro experiment byla zvolena austenitická, korozivzdorná a kyselinovzdorná ocel s nízkým obsahem uhlíku nazývaná „chemie“, odolná vůči mezikrystalové korozi. Nemagnetická, nekalitelná ocel, která je velmi dobře obrobitelná, svařitelná, lešitelná a vhodná ke tváření za studena. Použitelná do agresivních prostředí jako jsou přímořské oblasti, chemicky upravované prostředí bazénů, prostředí průmyslového typu a podobně. Lze využít pro styk s potravinami, avšak při styku s pitnou vodou je limitováno obsahem Niklu. Vhodná pro neoxidační prostředí obsahující silné organické a anorganické kyseliny při nižších koncentracích, do středních teplot – pro stavbu chemických zařízení včetně tlakových nádob, a to podle ČSN 69 0010.

4.1.1 Ocel DIN 1.4404 vyrobená aditivní výrobou

Vzorky vyrobené aditivní technologií byly vytištěny v centru 3D tisku Protolab spadajícího pod VŠB – TU Ostrava. Tato laboratoř disponuje 3D tiskárnou Renishaw AM400. Hodnoty chemického složení prášku, fyzikálních a mechanických vlastností materiálu vyrobeného aditivní technologií byly zjištěny v katalogovém listu od firmy Renishaw, která byla dodavatelem práškového materiálu pro aditivní výrobu vzorku pro tento experiment.

Renishaw AM400:

3D tiskárna Renishaw AM 400 je nejnovější zařízení aditivní výrobní platformy Renishaw. Nabízí zvýšení výkonu laseru z 200 W na 400 W, při zachování velikosti zaostření 70 μm na práškovém loži. To slouží pro uživatele, kteří počítají s flexibilitou při změně materiálů, kde se řada dostupného příslušenství stará o minimalizaci rizika křížové kontaminace. [6]

Optický systém

Fúzní systémy laserového práškového lože Renishaw využívají laserů s ytterbiovými vlákny o vysoké stabilitě a dvouosý galvanometr k přesnému nasměrování laserového paprsku v osách X a Y. Tento optický systém je kalibrován v přesnosti polohování $\pm 25 \mu\text{m}$ v celém pracovním prostoru. K dosažení korekce oblasti plochého pole využívá křemenný objektiv f-theta. Zaostřovací systémy f-theta jsou klasifikovány jako dvouosé optické systémy. Zdroj čistého vzduchu zajišťuje, že optický systém zůstane tepelně stabilní a nedojde tak k rozostření paprsku. [6]

Stroj

Renishaw AM 400 využívá osu Z s nepřímým kódováním z hnacího motoru s vysoce výkonným systémem těsnění. Standardní zdvih osy Z je 300 mm. Patentovaný filtrační systém SafeChange™ se stará o zachycení emisí z procesu bezpečným a efektivním způsobem. Inertní atmosféra začíná vznikem vakua k odstranění vzduchu a vlhkosti z komory a poté naplněním argonovým plynem. Část toku argonového plynu je odkláněna čímž se vytváří sekundární tok

plynu, který zabraňuje kontaminaci procesu emisemi vytvářenými na laserovém okénku. Stroj používá řídicí software Renishaw's Optical Control Software (OCS). Řídicí hardware sestává z počítače se systémem Windows a PLC ovládání pro subsystémové moduly jako jsou pohyblivé osy, recirkulace plynu a zpracování signálu senzoru. Bezpečnostní ovladač zajišťuje bezpečnost – blokování dveří, nouzové zastavení a kritické senzory (stav komory a bezpečnost laseru). Počítač se stará o řízení, kalibraci a procesní soubory laserových a optických systémů. HMI (Human Machine Interface) prostřednictvím obrazovky zajišťuje potřebné ovládací prvky pro nastavení stroje. [6]

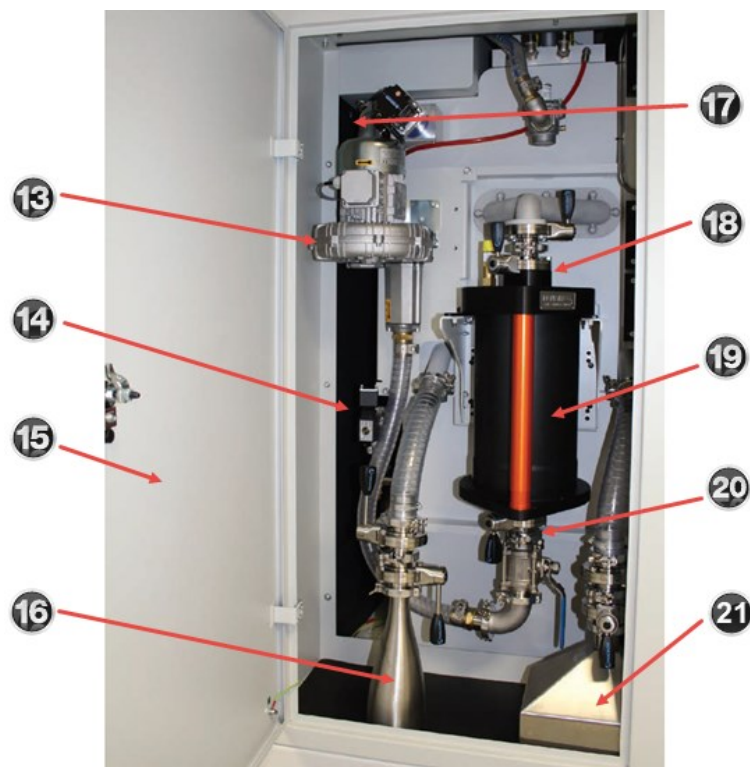
Manipulace s práškem

Násypka materiálu je umístěna v horní zadní části stroje a je vybavena plnicím ventilem, který dopravuje materiál. Násypka disponuje snímačem hladiny materiálu. Nevyužitý materiál se shromažďuje v jedné ze dvou přepadových nádob, který lze vyjmout, prosit pomocí síťovacího systému PRS 400 a znovu použít. Po dokončení stavby je výrobek vyjmut ze stroje přes příruční schránku stroje s inertní atmosférou. [6]



Obrázek 20 - Platforma aditivní výroby Renishaw AM 400

1 – Laserově bezpečné průhledové okénko, 2 – Dveře procesní komory, 3 – Uzamykatelný poklop pro rukavice, 4 – Rukavice pro přístup do komory, 5 – Spodní dvířka, 6 – Tlačítko reset, 7 – Nastavitelné nožičky, 8 – Laserové a PC dveře, 9 – Elektrický přístupový panel, 10 – Tlačítko nouzového zastavení, 11 – Dotyková obrazovka operátora, 12 – Hlavní elektrický izolátor



Obrázek 21 - Levá komora pro výměnu filtru

13 – Recirkulační čerpadlo plynu, 14 – Připojení argonu k okruhu systému, 15 – Levá přístupová dvířka pro bezpečnou výměnu filtru, 16 – Malá nádoba s práškem, 17 – Senzor kyslíku – varování horkého povrchu, 18 – Horní uzavírací ventil pro bezpečnou výměnu filtru, 19 – Odnímatelný bezpečně vyměnitelný filtr, 20 – Dolní uzavírací ventil pro výměnu filtru, 21- Velká přepadová nádoba

Parametry platformy Renishaw AM 400 a tištěného vzorku:

Tabulka 4 - Parametry platformy Renishaw AM 400 a tištěného vzorku [6]

Velikost komory	250 mm x 250 mm x 400 mm
Popis prášku	Prášek z korozivzdorné oceli DIN 1.4404 (AISI 316L)
Velikost částic prášku	15–45 μm
Tloušťka vrstvy	50 μm
Velikost zaostření	70 μm
Strategie skenování	Chessboard (šachovnice)
Border Power	110 W
Border Exposure time	100 μs
Border point distance	20 μm
Hatches Power	200 W
Hatches Exposure Time	80 μs
Hatches point distance	60 μm
Jump speed	5 000 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
Jump Delay	500 μs
Focus Jump speed	10 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
Doba dávkování	7 s
Rozsah teploty tavení	1371 °C až 1399 °C
Koncentrace kyslíku	<0,1% O ₂
Inertní plyn	Argon
Čistota	5,0 (99,998%)
Plnící / čistící spotřeba argonu	600 l až 1500 l
Spotřeba plynu	<30 l/hod
Počet vrstev	4000
Čas stavby 1 kusu	120 hod

Chemické složení vzorku vyrobeného aditivní výrobou:

Tabulka 5: Chemické složení prášku pro výrobu oceli DIN 1.4404 aditivní technologií v hm. %. [6]

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni
0,03	1,0	2,0	0,045	0,03	0,1	16,0-18,0	2,0-3,0	10,0-14,0

Fyzikální vlastnosti vzorku vyrobeného aditivní výrobou:

Tabulka 6: Fyzikální vlastnosti oceli DIN 1.4404 vyrobené aditivní technologií. [6]

Hustota [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	7,99
Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	16,2
Rozsah teploty tavení [°C]	1371-1399
Koeficient tepelné roztažnosti [K^{-1}]	$16 \cdot 10^{-6}$

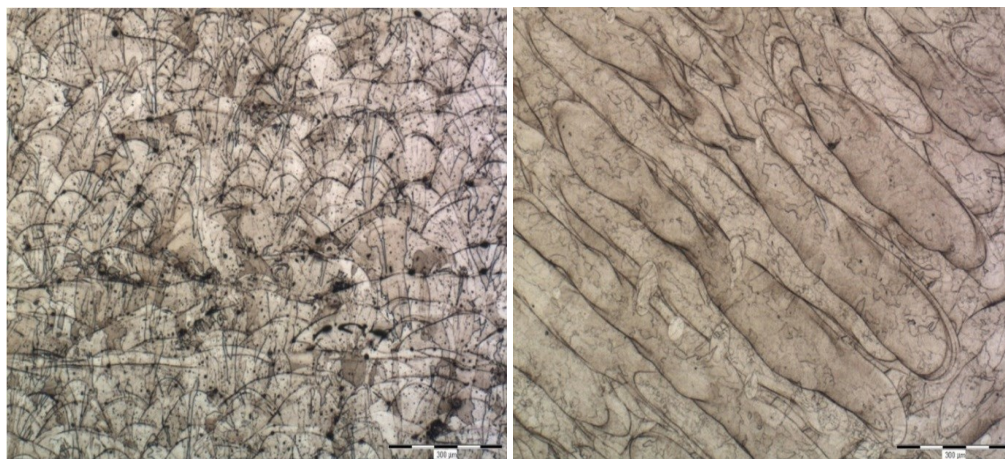
Mechanické vlastnosti vzorku vyrobeného aditivní výrobou:

Tabulka 7: Mechanické vlastnosti oceli DIN 1.4404 vyrobené aditivní technologií [6]

Mez pevnosti v tahu [MPa]	<i>Horizontální směr tisku</i>	676 ± 2
	<i>Vertikální směr tisku</i>	624 ± 17
Mez kluzu [MPa]	<i>Horizontální směr tisku</i>	547 ± 3
	<i>Vertikální směr tisku</i>	494 ± 14
Poměrné prodloužení [%]	<i>Horizontální směr tisku</i>	43 ± 2
	<i>Vertikální směr tisku</i>	35 ± 8
Modul pružnosti [GPa]	<i>Horizontální směr tisku</i>	197 ± 4
	<i>Vertikální směr tisku</i>	190 ± 10
Tvrdost podle Vickerse [HV 0,5]	<i>Horizontální směr tisku</i>	198 ± 8
	<i>Vertikální směr tisku</i>	208 ± 6
Parametr drsnosti povrchu Ra [μm]	<i>Horizontální směr tisku</i>	4-6
	<i>Vertikální směr tisku</i>	4-6

Mikrostruktura vzorku vyrobeného aditivní výrobou:

Mikrostruktura vzorku byla převzata z diplomové práce A. Bendy [28], ve které byly zkoumány mikrostrukturní a únavové charakteristiky oceli DIN 1.4404. Zkoumané vzorky přitom byly připravené aditivní výrobou, technologií SLM, strategií skenování Chessboard (šachovnice), na platformě Renishaw AM 400, což jednoznačně souvisí s vzorkem vyrobeným pro tento experiment.



Obrázek 22 - Mikrostruktura korozivzdorné oceli DIN 1.4404 vyrobené aditivní výrobou (vlevo podélný řez, vpravo příčný řez) [28]

4.1.2 Ocel DIN 1.4404 vyrobená válcováním

Tato ocel společně s atestem byla dodána od dodavatele AK1324 s.r.o. Hodnoty chemického složení a mechanických vlastností válcovaného materiálu byly zjištěny z příloženého atestu. Na dodaný materiál bylo aplikováno rozpouštěcí žíhání při teplotě 1050–1100 °C.

Chemické složení:

Tabulka 8: Chemické složení válcované oceli DIN 1.4404 v hm. %.

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni
0,012	0,3	1,75	0,034	0,024	0,049	16,83	2,03	10,11

Mechanické vlastnosti:

Tabulka 9: Mechanické vlastnosti válcované oceli DIN 1.4404.

Mez kluzu [MPa]	$R_{p0,2}$	239
	$R_{p1,0}$	277
Mez pevnosti [MPa]	R_m	566
Tažnost [%]	A	58
Kontrakce [%]	Z	77
Tvrdost podle Brinela [HB]	min	139
	max	145

4.2 Zvolený obráběcí stroj a nástroj

Pro uskutečnění experimentu byl použit stroj NLX 2500/700 od firmy DMG MORI SEIKI. Kombinace držáku a nástroje byla zvolena od firmy Sandvik Coromant, a to konkrétně držák Sandvik Coromant C4PDJNR-27055-15MP osazený vyměnitelnou břitovou destičkou Sandvik Coromant CNMG 432-SM 1115.

4.2.1 Obráběcí stroj

DMG MORI SEIKI NLX 2500/700 je vysoce tuhé a vysoce přesné soustružnické centrum. Tento stroj je vybaven BMT (Built-in motor), který dosahuje výkonných soustružnických schopností a vynikajícího frézovacího výkonu, stejně tak disponuje vysokou tuhostí lože. Pokud je stroj vybaven systémem CELOS + MAPPS V, umožňuje obrábění různých obrobků od jednoduchých až po tvarově složité součásti se snadnou obsluhou. U tohoto modelu byl vylepšen základní výkon soustružení jako je spolehlivost, přesnost, tuhost a provozuschopnost. Využívá originální technologie DMG MORI, jako tepelné řízení posunu a vysoká tuhost lože [38].



Obrázek 23 - Soustružnické centrum – DMG MORI SEIKI NLX 2500/700

Specifické parametry stroje:

Tabulka 10 - Specifické parametry stroje [38]

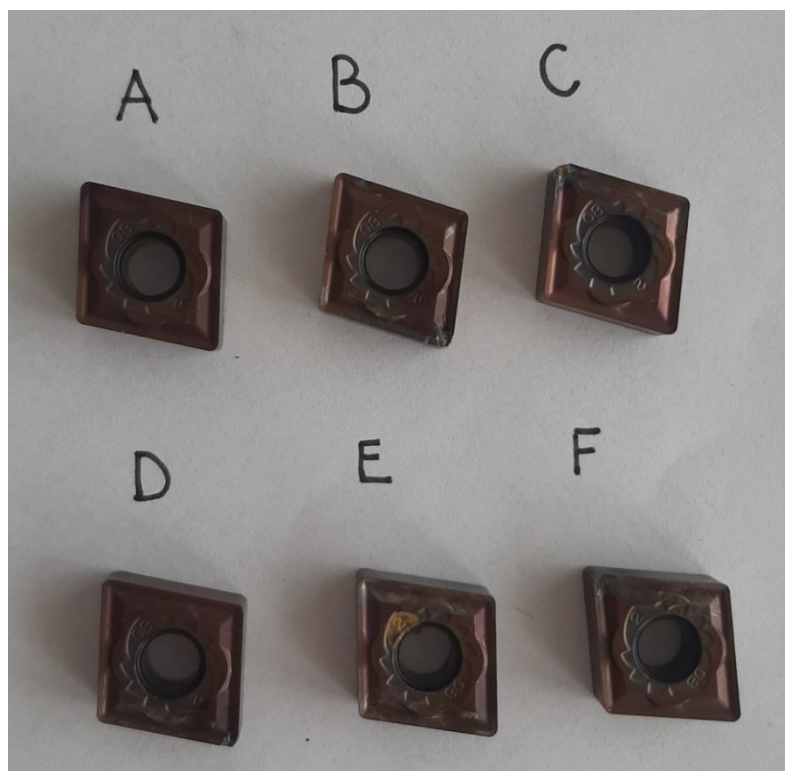
Maximální průměr obrobku pro soustružení	366 mm
Maximální délka obrobku pro soustružení (s koníkem)	705 mm
Maximální otáčky motoru vřetena	4000 min ⁻¹
Počet nástrojů v revolverové hlavě	12
Maximální otáčky rotačního nástroje	10 000 min ⁻¹
Vysokorychlostní posuv osy X/Z	30/30 m/min
Pojezd koníku	734 mm
Výkon motoru	22 kW (střídavý proud)
Kroutící moment	862 N
Výška stroje	2 200 mm
Podlahový prostor (šířka x hloubka)	3 347 mm x 2 106 mm
Podlahový prostor s dopravníkem třísek	3 981 mm x 2 106 mm
Hmotnost stroje	5 820 kg
Řídící jednotka	MITSUBISHI M730BM

4.2.2 Řezný nástroj

Pro obrábění materiálu DIN 1.4404 byl zvolen držák VBD – Sandvik Coromant C4-PDJNR-27055-15MP. Jako řezný nástroj byla použita vyměnitelná břitová destička Sandvik Coromant CNMG 432-SM-1115, zobrazená na Obr.24. Hlavní parametry VBD jsou sepsány níže a zobrazeny na Obr. 25 a jsou důležité pro volbu držáku VBD.



Obrázek 24 - Balení vyměnitelných břitových destiček SANDVIK COROMANT CNMG 432-SM-1115

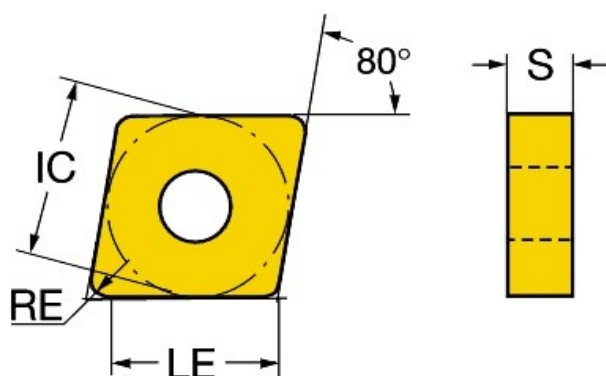


Obrázek 25 - VBD použité pro experiment, označené podle obráběných vzorků písmeny A,B,C,D,E,F

Parametry VBD:

Tabulka 11 - Parametry VBD [37]

Substrát	Hard Carbon (HC)
Povlak	PVD TiAlN + AlCr203 + TiAlN
Počet řezných hran	4
Tloušťka destičky (S)	4,7625 mm
Poloměr zaoblení (RE)	0,7938 mm
Efektivní délka břitu (LE)	8,5 mm
Průměr vepsané kružnice (IC)	12,7mm



Obrázek 26 - Hlavní parametry VBD [37]

4.3 Měření řezných sil

Pro měření řezných sil byl použit jako snímač vícesložkový dynamometr Kistler Type 9129AA, který je zobrazen na Obr. 27, upnutý na revolverové hlavě a na něm upnutý řezný nástroj. Je určený pro měření tří složek vektoru výsledné síly a tří složek vektoru výsledného momentu. Umožňuje přesné měření dynamických sil se zaručením minimální teplotní chyby. Tento dynamometr disponuje čtyřmi senzory síly, které se skládají vždy ze tří krystalů, z nichž je jeden citlivý na tlak v ose y a zbylé dva na smyk v ose x nebo ose z [39].



Obrázek 27 - Dynamometr Kistler Type 9129AA – nesoucí řezný nástroj, upnutý na revolverové hlavě

Dalšími prvky pro měření sil byly zvoleny – vícekanálový přijímač Kistler Type 5070A, univerzální laboratorní nábojový zesilovač Kistler LabAmp Type 5165A a univerzální systém sběru dat DAQ-System Type 5697A. Kistler LabAmp poskytuje měření nízkého šumu, přičemž zesiluje signál a společně se sběračem dat DAQ-System sbírá a odesílá vysoce kvalitní data do počítače [39]. Na Obr. 28 je zachycen vícekanálový přijímač Kistler Type 5070A a nábojový zesilovač Kistler LabAmp Type 5165A.



Obrázek 28 – Přijímač Kistler Type 5070A (dole) a zesilovač Kistler LabAmp type 5165A (nahore)

Dynamometr je přístroj, který musí zaručit nezávislost měřící veličiny vůči provozním vlastnostem přístroje. Také musí být schopen měřit sledované veličiny ve zvoleném rozsahu s maximální přesností a zaručit stálost měřených hodnot v čase, včetně její opakovatelnosti [1].

Dynamometry musí zajistit tyto požadavky [1]:

- Tuhost, která je dána velikostí zatěžující síly F , způsobuje deformaci y . Velikost deformace závisí na deformačním elementu (senzor) a na celkovém konstrukčním provedení dynamometru i na měřící metodě.
- Citlivost, související s citlivostí použité měřící metody a tuhostí konstrukčního provedení dynamometru. Citlivost musí být taková, že nejmenší odečítaná jednotka odpovídá celkové hodnotě měřené veličiny při dodržení dostatečné přesnosti.
- Stálost údajů, která závisí na tuhosti, citlivosti a přesnosti od nulové polohy až po zachycení údajů, po celou dobu měření.
- Opakovatelnost údajů přímo souvisí s těmito výše uvedenými charakteristikami.
- Setrvačnost, která závisí na hmotnosti soustavy, by při dynamických měřeních měla být co možná nejmenší.
- Konstrukce dynamometrů musí zajistit, aby se složky řezné síly vzájemně neovlivňovaly.

Zařízení na měření řezných složek se skládá ze tří částí, kterými jsou [1]:

- Pružný člen – senzor (krystaly), přebírá zatížení a překonává změny jako jsou deformace, změny polohy atd.
- Snímač – přeměňuje mechanické veličiny pružného členu na analogické parametry měřící aparatury
- Přijímač – Zesiluje a zpracovává signál snímače, může zapisovat velikosti zatížení

Dynamometry se dělí podle následujících hledisek [1]:

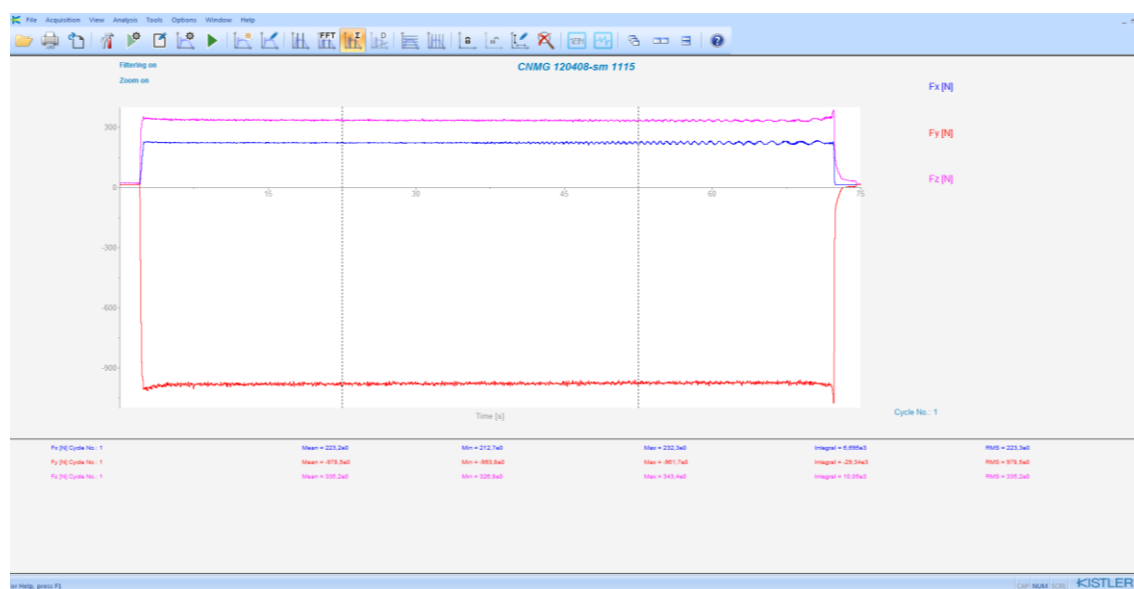
- Podle počtu měřených složek – jednosložkové, dvousložkové, třísložkové, pro měření točivých momentů
- Podle způsobu přenosu působení síly z deformačního členu na indikační – mechanické, hydraulické, pneumatické, optické, **elektrické** (indukční, odporové, **využívající piezoelektrického jevu**)
- Podle metody obrábění – soustružení, vrtání, frézování apod., nebo **dynamometry univerzální**

4.3.1 Metodika měření řezných sil

Pro tento experiment bylo navrženo přímé měření řezných sil, a jejich točivých momentů, které je založeno na měření deformací v soustavě Stroj-Nástroj-Obrobek během soustružení s použitím dynamometru. Konkrétně se u tohoto experimentu využívalo měření řezných složek sil pomocí elektrického dynamometru, využívajícího piezoelektrického jevu. Piezoelektrické dynamometry fungují na principu vzniku elektrického náboje na povrchu krystalů při mechanickém zatížení. Nejpoužívanějším materiálem těchto krystalů je křemen. Hlavní částí

piezoelektrického snímače je vhodně vyříznutá měřicí destička z příslušného krystalu. Při zatížení je potom velikost náboje přímo úměrná velikosti působící síly, přičemž při poklesu zatížení lineárně klesá [1].

Pro sběr dat z přijímače a zesilovače Kistler posloužil software Dynoware, který je v kombinaci se zařízeními LabAmp a DAQ-System výkonným softwarem pro získávání a zobrazování dat. Kistler LabAmp Type 5165A je univerzální laboratorní nábojový zesilovač pro měření síly, tlaku, vibrací, reakčního momentu a deformací pomocí piezoelektrických senzorů. Kistler DAQ-System Type 5697A je univerzální systém sběru dat v kombinaci s Dynoware. Připojení k PC bylo umožněno USB kabelem. Samotné vykreslení potřebných dat proběhlo v softwaru Kistler Dynoware Type 2825-D-03, jehož systémové prostředí je možno sledovat na Obr. 29. V tomto softwaru bylo nutné nastavit potřebné složky síly pro vykreslení, poté dopočítat a dosadit frekvenci závislou na otáčkách obrobku, a nakonec zvolit optimální oblast pro vyhodnocení velikosti složek řezných sil.



Obrázek 29 - Vyhodnocování složek řezných sil v softwaru Kistler Dynoware

Zjištěné složky řezné síly, jsem následně vypsals do tabulkového procesoru Microsoft Excel 365 a poté dosadil do vztahu (2.2), který říká že síla řezání je rovna odmocnině z kvadratického součtu všech složek:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad (2.2)$$

Hodnoty celkové síly F byly vypočteny, zapsány do tabulek a následně z nich byly sestrojeny přehledné grafy v závislosti na strojním čase obrábění, respektive na čase, kdy byl nástroj v řezu. Tyto grafy zobrazují rozdíl průměrných velikostí celkových řezných sil při soustružení za stejných řezných podmínek mezi totožným materiálem, vyrobeným odlišnými technologiemi. Měření složek řezných sil probíhalo po celou dobu každého řezu, přičemž doba řezání se kvůli zmenšujícímu se průměru obrobku zkracovala.

4.4 Měření vibrací

Pro měření vibrací byl zvolen duální dynamický zesilovač náboje KISTLER LabAmp Type 5165A, který se používá pro měření dynamických signálů piezoelektrickými nebo piezotronovými snímači. Piezoelektrický snímač síly produkuje elektrický náboj, který se mění v přímém poměru se zátěží působící na snímač [39]. Do zařízení LabAmp byly zapojeny dva druhy piezoelektrických akcelerometrů, rovněž od firmy Kistler. První druh akcelerometru nese označení 8702B25T (viz Obr. 30, vlevo) a pro měření byl použit jeden kus. Druhý druh s označením 8704B25T, který je možno vidět na Obr. 30 vpravo, byl použit v počtu dvou kusů. Rozdíl mezi těmito akcelerometry je v konstrukčním řešení a příváděném kabelu. Magnetický systém upínání akcelerometrů zajišťuje měření v širokém rozmezí teplot.



Obrázek 30 - Akcelerometry Kistler – 8702B25T (vlevo), 8704B25T (vpravo) [39]

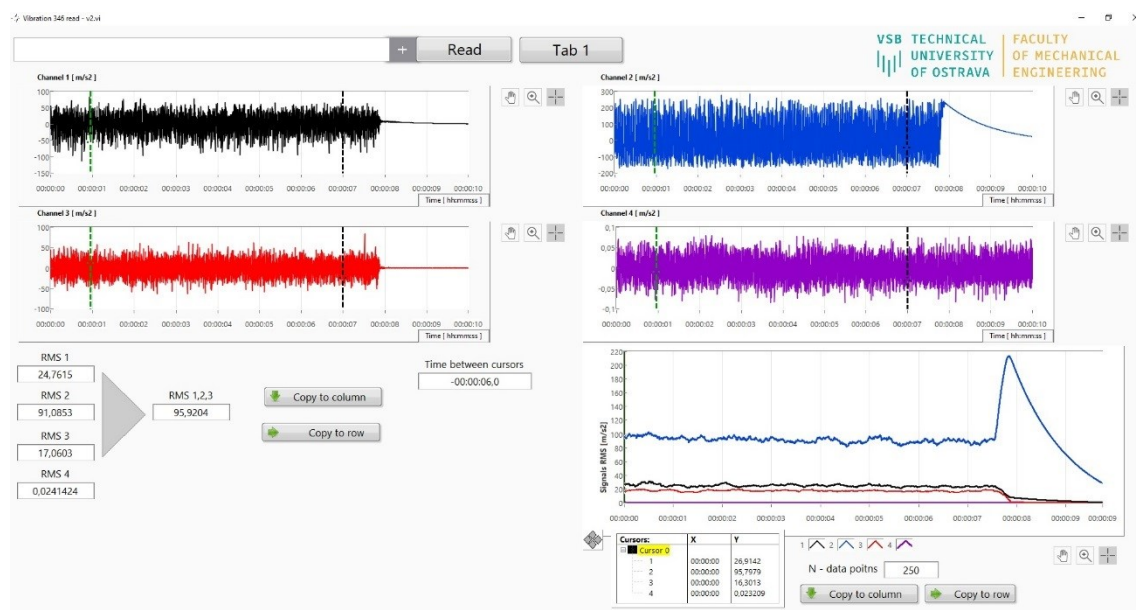
4.4.1 Metodika měření vibrací

Akcelerometry byly upevněny na upínací zařízení nožového držáku. Jeden akcelerometr ve směru hlavní složky řezné síly, další ve směru složky posuvové síly a poslední ve směru složky pasivní síly. Měřicí zařízení LabAmp bylo propojeno s PC ethernet kabelem. Sběr hodnot zrychlení vibrací obstaral software Kistler LabAmp 516XA Demo (viz Obr. 31)



Obrázek 31 - Software KISTLER LabAmp 516XA Demo

Pro vyhodnocení dat byl použit speciálně vytvořený software Vibration 346 read, jehož systémové prostředí je možno vidět na Obr. 32. Tento systém zpracovává naměřená data a vyhodnocuje velikost vibrací v daných směrech. Vyhodnocovaný úsek vibrací byl dlouhý 6 vteřin. Pomocí softwaru Vibration 346 read byly vyhodnocovány velikosti zrychlení vibrací v jednotlivých směrech. Pro vyhodnocení byla vybrána hodnota RMS, což je kvadratický průměr výslednice zrychlení vibrací, která je složena ze složek zrychlení vibrací působících ve směrech složek řezných sil ($RMS F_c$, $RMS F_p$, $RMS F_f$). Tento parametr nejlépe vystihuje určitý signál a zahrnuje celý průběh signálu včetně amplitud.



Obrázek 32 - Systémové prostředí softwaru Vibration 346 read

Data získaná ze softwaru, kterými byly jednotlivé složky zrychlení vibrací v daných směrech ($RMS F_c$ – zrychlení vibrací ve směru řezné složky síly, $RMS F_f$ – zrychlení vibrací ve směru posuvové složky síly a $RMS F_p$ – zrychlení vibrací ve směru pasivní složky síly) jsem vypsál do programu Microsoft Excel 365 a poté dosadil do vzorce (3.1),

$$RMS F = \sqrt{RMS F_c^2 + RMS F_p^2 + RMS F_f^2} \quad (3.1)$$

kde $RMS F$ je výslednice zrychlení vibrací [$mm \cdot s^{-2}$].

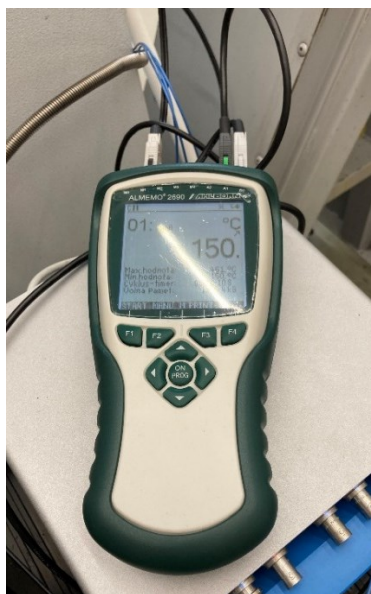
4.5 Měření teploty v místě styku řezného nástroje s obrobkem

Pro tento experiment bylo zvoleno bezdotykové měření teploty za pomoci úhrnného pyrometru Maurer KTR 1085 (viz Obr. 33). K měření využívá tento pyrometr infračervené záření vyzařované ze zdroje tepla v úzkém spektrálním rozsahu. Tepelné záření je přijímáno přes optický systém na teploměrné čidlo, kterým obvykle bývá termočlánek nebo odporový teploměr. U současně vyráběných měřidel se ke zpracování signálu využívá moderních elektronických obvodů řízených mikroprocesorem [35]. Úhrnné pyrometry jsou specializované nástroje využívané pro úzkou skupinu aplikací, mezi které se řadí měření teploty v místě styku obrobku s řezným nástrojem při soustružení.



Obrázek 33 - Pyrometr MAURER KTR 1085

Dalším zařízením pro měření teploty při obrábění byl zvolen univerzální ruční měřicí přístroj AHLBORN – ALMEMO 2690-8A (Obr. 34). Tento měřicí přístroj je velmi přesný s vysokou rychlostí měření a disponuje 5 měřicími vstupy a 2 výstupy. Umožňuje až 500 měření/s a zaznamenání až 200 000 naměřených hodnot [40].



Obrázek 34 - Univerzální měřicí přístroj AHLBORN – ALMEMO 2690-8A

4.5.1 Metodika měření teploty v místě styku řezného nástroje s obrobkem

Pyrometr MAURER KTR 1085 byl zaměřen do oblasti řezání, a to přímo na špičku řezného nástroje. Pyrometr byl přitom propojen pomocí speciálních ALMEMO konektorů s univerzálním ručním měřicím přístrojem AHLBORN – ALMEMO 2690-8A. Propojení s PC bylo provedeno přes USB kabel. Software Almemo-Control se postaral o vypsání měřených hodnot do textového editoru – poznámkového bloku. Interval zaznamenávání naměřených hodnot teploty byl 10 vteřin. Tyto hodnoty byly následně vypsány do tabulkového procesoru Microsoft Excel 365. Dále jsem hodnoty zprůměroval. Ze zprůměrovaných hodnot byly sestaveny přehledné grafy, které zobrazují rozdíl teplot při soustružení za stejných řezných podmínek mezi stejným materiálem vyrobeným odlišnými technologiemi.

4.6 Měření parametrů drsnosti obrobeného povrchu

Měření parametrů drsnosti povrchu obrobeného materiálu se u tohoto experimentu provádělo pomocí dotykového měřicího přístroje HOMMEL-ETAMIC W5. Dle normy ČSN EN ISO 3274 je dotykový měřicí přístroj definován jako přístroj určený ke zkoumání daných povrchů snímacím hrotem, přičemž získává úchytky ve formě profilu povrchu, vypočítává parametry a je přitom schopen daný profil zaznamenat [33].

HOMMEL-ETAMIC W5 (viz Obr. 35) je přenosné zařízení pro měření parametrů drsnosti povrchu třídy přesnosti 1 dle DIN 4772 a disponuje snímači T1E/T3E. Vyhodnocuje až 25 parametrů drsnosti. Vestavěná baterie Li-Ion umožňuje minimálně 800 měřicích cyklů na jedno nabití. Vestavěná micro SD karta disponuje pamětí až na 10 tisíc měření. Při měření se nastaví požadované parametry a změřená data jsou poté vypsána na barevný grafický 2“ displej [41].



Obrázek 35 - Přenosný dílenský přístroj na měření parametrů drsnosti povrchu HOMMEL-ETAMIC W5

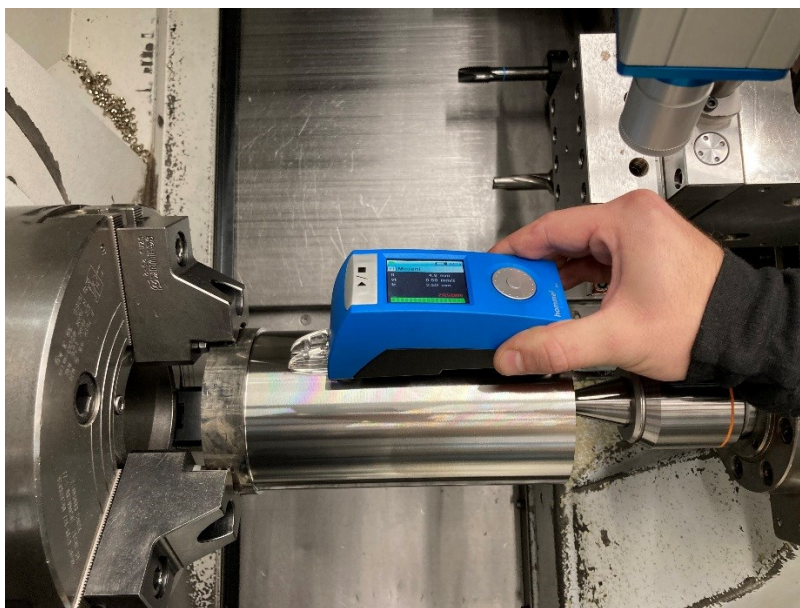
Základní parametry zařízení pro měření drsnosti povrchu HOMMEL-ETAMIC W5:

Tabulka 12 - Parametry zařízení pro měření drsnosti povrchu HOMMEL-ETAMIC W5 [41]

Parametry drsnosti	<i>DIN EN ISO 4287 - Ra, Rz, Rt, Rq, RSm, Rmr (%), Rmr (μm) Rp, Rmax</i>
	<i>DIN EN ISO 13 565 – Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2, A1, A2</i>
	<i>MOTIF – R, AR, Rx</i>
	<i>ASME B46 – Rpm</i>
	<i>JIS – Rz-JIS, Ry-JIS (viz DIN EN ISO 4287 parametr Rz), tp (%), tp (μm – Rmr)</i>
	<i>DIN EN 10 049 – RPc</i>
	<i>Daimler DB N 31 007 – R3z</i>
Délky měřeného úseku	<i>1,5 mm/ 4,8 mm/ 15,0 mm</i>
Snímač T1	<i>induktivní snímač; hrot 2 $\mu\text{m}/90^\circ$; přitlačná síla 1,5 mN</i>
Meřící rozsah/ rozlišení	<i>T1E – $\pm 100 \mu\text{m}/5 \text{ nm}$</i>
	<i>T3E – $\pm 320 \mu\text{m} (+210 \mu\text{m}/-110 \mu\text{m}) / 5 \text{ nm}$</i>
Třída přesnosti	<i>1 dle DIN 4772</i>
Vlnová délka cut-off	<i>0,25 mm/ 0,8 mm/ 2,5 mm</i>
Filtry	<i>DIN EN ISO 11 562 – fázově korektní Gaussův filtr s normovanými cut-offy</i>
	<i>DIN EN ISO 13 565-1 – dvojnásobný Gaussův filtr k výpočtu materiálového podílu (Rk-parametrů)</i>
	<i>Ls – filtr chvění DIN EN ISO 3 274</i>
Rozlišení	<i>0,005 μm</i>
Rozměry D x V x Š	<i>128 mm x 63 mm x 50 mm</i>
Hmotnost	<i>270 g</i>

4.6.1 Metodika měření parametrů drsnosti obrobeneho povrchu

Měření parametrů drsnosti obrobeneho povrchu probíhalo v souladu s normou ČSN ISO 4287, po každém dokončeném řezu. Obrobek byl upnutý ve sklíčidle soustružnického centra a přenosné zařízení pro měření parametrů drsnosti povrchu na něj bylo přiloženo a lehce přitlačeno, aby nedocházelo k odchylce měření – zobrazeno na Obr. 36. Po změření parametrů se z obrazovky „drsnoměru“ odečetli požadované hodnoty R_a a R_z , které byly následně zapsány do tabulkového procesoru Microsoft Excel 365. Poté byly z těchto hodnot vytvořeny přehledné grafy pro jednotlivé řezné podmínky.



Obrázek 36 - HOMMEL-ETAMIC W5 při měření parametrů drsnosti obrobeneho povrchu

4.7 Porovnání opotřebení nástroje

Opotřebení břitu nástroje bylo pozorováno pomocí mikroskopu Mitutoyo TM-505B a Deltapix HDMI16MDPX kamery. Nástrojářský mikroskop Mitutoyo TM-505B je vhodný pro kontrolu a měření rozměrů a úhlů pomocí křížového XY stolu a vestavěné kruhové stupnice. Disponuje LED osvětlením kontury a povrchu, tudíž poskytuje optimální světelné podmínky pro kontrolu objektů [43]. Barevná kamera Deltapix HDMI16MDPX s rozlišením 3264 x 1836 pixelů je ideálním řešením pro měřicí nástroj do oblasti průmyslu a výzkumu. Kamera byla propojena s PC pomocí USB a HDMI kabelu, což umožňuje přenos živého obrazu o snímkové frekvenci 30 fps s rozlišením 1920 x 1080 pixelů [42]. Sestava mikroskopu a kamery je zobrazena na Obr. 37, přičemž na měřicím stole je vidět nasvětlená, kontrolovaná VBD.



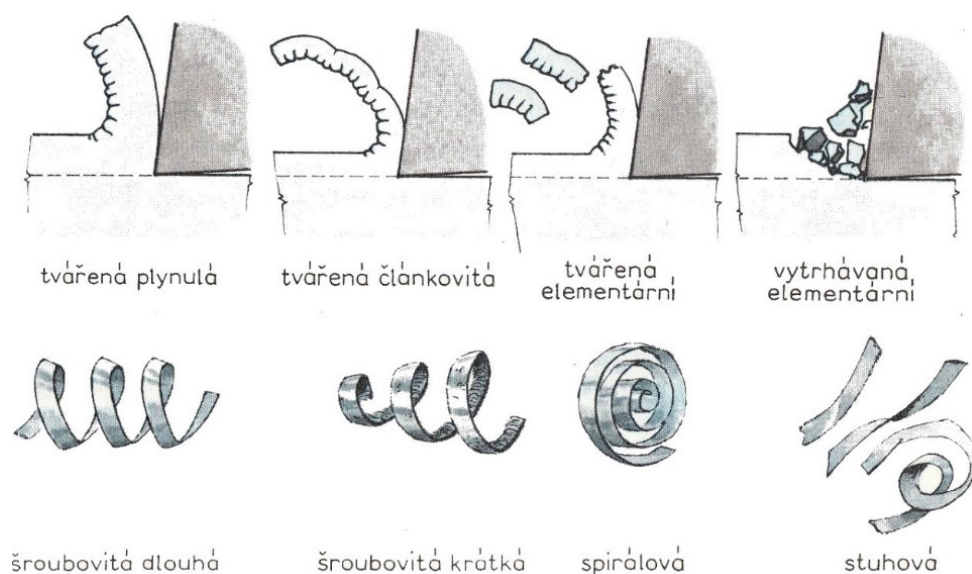
Obrázek 37 - Sestava mikroskopu Mitutoyo TM-505B a kamery Deltapix HDMI16MDPX

4.7.1 Metodika porovnávání opotřebení nástrojů

Porovnávání opotřebení nástrojů se provádělo po každém řezu, kdy byla VBD vyjmuta z nástrojového držáku a umístěna na pracovní stůl mikroskopu. Na tomto stole byla řádně vystředěna nejdříve ručně a poté pomocí posuvů v ose X a Y. Sledováno a vizuálně hodnoceno bylo hřbetní opotřebení nástroje, kde jsou pozorovatelná nejvýznamnější opotřebení. Poté bylo pomocí softwaru MoticImage Plus 2.0 zaznamenáno (vyfoceno) opotřebení destičky po každém řezu. Jednotlivé snímky byly následně zvětšeny a vloženy do tabulkového procesoru Microsoft Excel 365, kde byly přehledně porovnány, přičemž nejvýznamnější opotřebení byly přiloženy do 4. kapitoly. Při značném opotřebení břitu bylo měření ukončeno, a s přispěním údajů o skokové změně velikosti složek řezných sil, vibrací a teplot byly dopočteny strojní časy trvanlivosti břitu za určitých řezných podmínek.

4.8 Porovnání tvorby třísky

Tvarování třísky bylo sledováno vizuálně. Tříska má mít určité vlastnosti v ohledu na rozměr a tvar, z důvodu manipulace při odvodu ze stroje a při jejím dalším zpracování. Ideálně by tedy měla zaujímat co nejmenší objem. Dlouhé plynulé třísky zvyšují riziko poškození nástroje vlivem namotávání třísky na nástroj a také mohou mít negativní vliv na jakost obrobeného povrchu. Vhodným tvarem třísky je z hlediska manipulace a bezpečnosti práce článkovitá nebo elementární tříska. Rozeznává se několik druhů třísek, které můžeme sledovat na Obr. 38.



Obrázek 38 - Druhy třísek vznikajících při soustružení [35]

4.8.1 Metodika porovnávání tvorby třísky

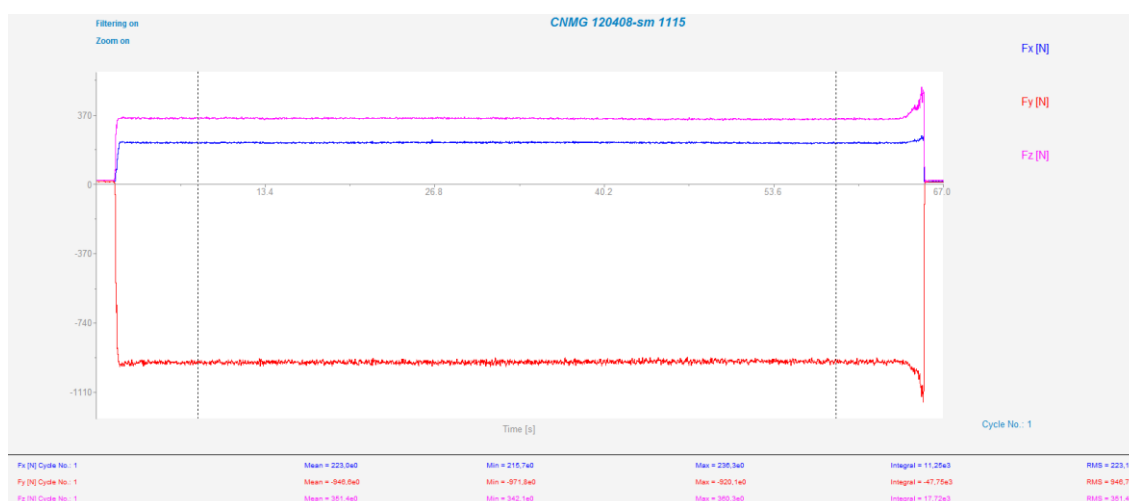
Tvorba třísky byla zkoumána po dokončení každého řezu, kdy byla vyjmuta určitá část třísek ze stroje. Tyto třísky se umístily na bílý podklad a zde se označili, kterému vzorku a jakým řezným podmínkám náleží. Následně byly vyfotografovány a vloženy do uzavíracího sáčku. Ostatní třísky byly za pomoci dopravníku odvedeny do kontejneru. Porovnávanými faktory byl tvar a objem třísek.

5 VÝSLEDKY EXPERIMENTU A JEJICH ZHODNOCENÍ

Pro tento experiment byly určeny tři vzorky válcované oceli označené písmeny A, B a C a tři vzorky tištěné oceli značené písmeny D, E, F. Tyto vzorky měli vždy počáteční průměr 100 mm. Vzorek A byl porovnáván se vzorkem D, při řezné rychlosti $v_c = 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Vzorek B byl porovnáván se vzorkem E, při řezné rychlosti $v_c = 185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Nakonec byl porovnáván vzorek C se vzorkem F při řezné rychlosti $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Posuvy pro všechny řezné rychlosti byly stanoveny na $f = 0,25 \text{ mm}$ a $f = 0,3 \text{ mm}$. Hloubka řezu a_p během všech řezů byla 2 mm. Průměr testovaných vzorků se kvůli hloubce řezu po každém řezu zmenšil o 4 mm. Délka obrábění byla přizpůsobena řezným podmínkám, zejména v závislosti na posuvu a trvanlivosti nástroje, a to v hodnotách 180 mm pro nižší hodnoty a 165 mm pro vyšší hodnoty řezných rychlostí a posuvů. Pro jednotlivé řezné podmínky bylo stanoveno 8 řezů, přičemž při značném opotřebení nástroje se tato měření ukončila.

5.1 Porovnání řezných sil společně s opotřebením nástroje

V softwaru Dynoware byly vyhodnocovány jednotlivé složky řezných sil (viz Obr. 39). Průměrné hodnoty jednotlivých složek řezných sil ($F_{(x)\text{mean}}$) se následně dosadily do vzorce a vypočítali se průměrné velikosti výsledných řezných sil. Všechny tyto síly byly zpracovány do tabulek a ve spojnicových grafech se následně porovnali průběhy průměrných velikostí výsledných řezných sil pro jednotlivé řezné podmínky. Všechny tyto grafy byly barevně rozděleny. U grafů pro posuv $f = 0,25 \text{ mm}$ byly síly dosažené při obrábění válcovaných vzorků označeny zeleně a síly při obrábění tištěných vzorků fialově. U grafů pro posuv $f = 0,3 \text{ mm}$ byly síly dosažené při obrábění válcovaných vzorků značeny modře a síly při obrábění tištěných vzorků červeně. Na osu X byla nanesena doba trvanlivosti nástroje [s] a na osu Y velikost celkové řezné síly [N]. Snímky opotřebení byly foceny po každém řezu, ale nebylo na nich pozorovatelné značné opotřebení. Z toho důvodu jsou dosazeny pouze snímky z řezů, kde byla viditelná znatelná změna opotřebení.



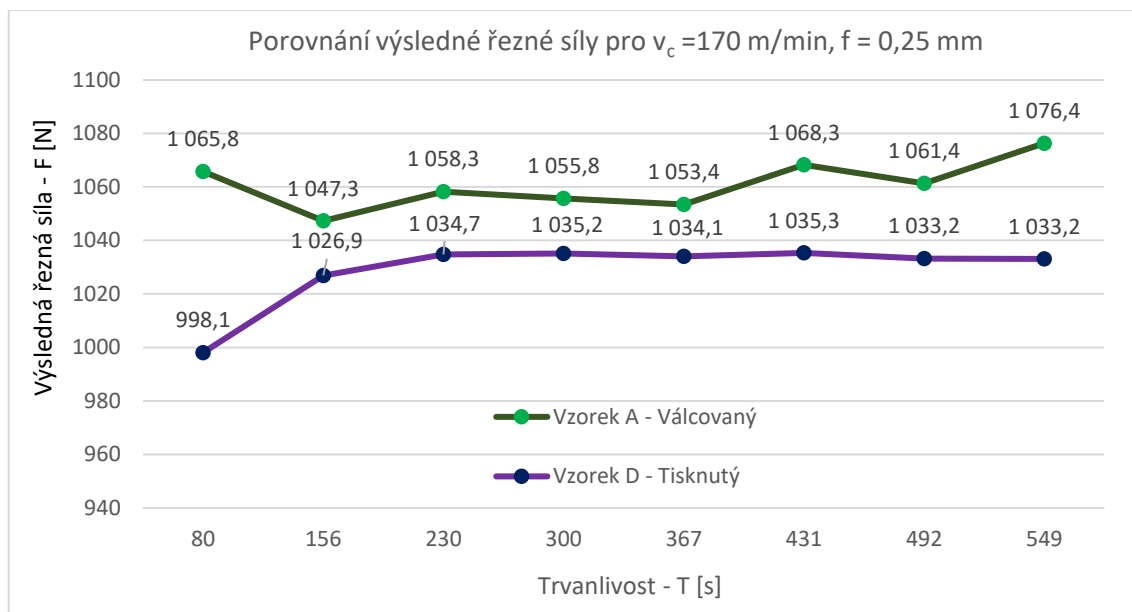
Obrázek 39 - Vyhodnocení složek řezných sil v softwaru Dynoware pro vzorek D; $v_c = 170$; $f = 0,25$; 5. řez

$F_p \text{ mean} = 223,0 \text{ N}$	$F_p \text{ min} = 215,7 \text{ N}$	$F_p \text{ max} = 236,3 \text{ N}$	$F_p \text{ integral} = 11,25e^3 \text{ N}$	$F_p \text{ RMS} = 223,1 \text{ N}$
$F_c \text{ mean} = -946,6 \text{ N}$	$F_c \text{ min} = -971,8 \text{ N}$	$F_c \text{ max} = -920,1 \text{ N}$	$F_c \text{ integral} = -47,75e^3 \text{ N}$	$F_c \text{ RMS} = 946,7 \text{ N}$
$F_f \text{ mean} = 351,4 \text{ N}$	$F_f \text{ min} = 342,1 \text{ N}$	$F_f \text{ max} = 360,3 \text{ N}$	$F_f \text{ integral} = 17,27e^3 \text{ N}$	$F_f \text{ RMS} = 351,4 \text{ N}$

5.1.1 Porovnání řezných sil a opotřebení vzorku A se vzorkem D

Tabulka 13 - Složky řezných sil při obrábění válcovaného vzorku A a tištěného vzorku D, při posuvu 0,25 mm

					Vzorek A	Vzorek D
Rychlost	Posuv	Trvanlivost	Řez	Složka síly	Velikost složky síly	Velikost složky síly
$m \cdot min^{-1}$	mm	s	-	-	N	N
170	0,25	80	1	Fp	210,5	216,9
				Fc	-984,3	-918
				Ff	350,4	326,2
				F	1065,8	998,1
		156	2	Fp	219,3	220,6
				Fc	-968,7	-942,6
				Ff	332,3	342,7
				F	1047,3	1026,9
		230	3	Fp	223,4	224,1
				Fc	-978,5	-947,5
				Ff	335,5	350,3
				F	1058,3	1034,7
		300	4	Fp	224,5	223,6
				Fc	-975,6	-947,8
				Ff	335,3	351,1
				F	1055,8	1035,2
		367	5	Fp	223,6	223
				Fc	-972,7	-946,6
				Ff	336,9	351,4
				F	1053,4	1034,1
		431	6	Fp	228,2	221,2
				Fc	-984,7	-948,1
				Ff	345,8	352,3
				F	1068,3	1035,3
		492	7	Fp	227,4	220,5
				Fc	-978,4	-945,1
				Ff	342,8	354,5
				F	1061,4	1033,2
		549	8	Fp	231,9	220,8
				Fc	-988,3	-944
				Ff	357,8	357,1
				F	1076,4	1033,2
				Průměr F	1060,8	1028,8

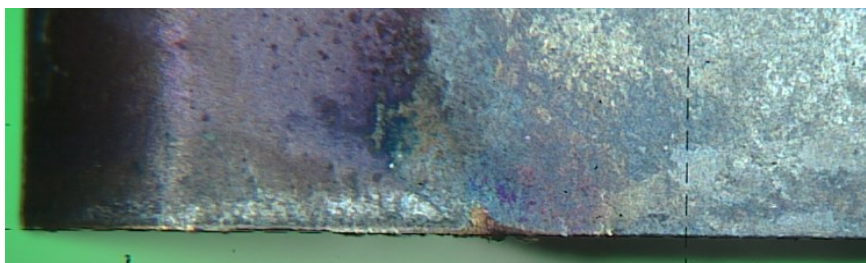


Graf 1 - Porovnání průměrných velikostí výsledné řezné síly při $v_c = 170 \text{ m/min}$, $f = 0,25 \text{ mm}$

Pro obrábění těchto vzorků byla zvolena řezná rychlost $v_c = 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Zde byla porovnávána průměrná velikost výsledné řezné síly válcovaného vzorku A a tištěného vzorku D v závislosti na trvanlivosti nástroje. Na grafu 1 můžeme pozorovat, že řezná síla při posuvu $0,25 \text{ mm}$ byla patrně vyšší při obrábění válcovaného vzorku než při obrábění vzorku tištěného. Nástroj přitom nebyl nijak významně opotřeben ani u jednoho obrábění (Obr. 40 a 41) a proto by se těmito nástroji mohlo dále obrábět.



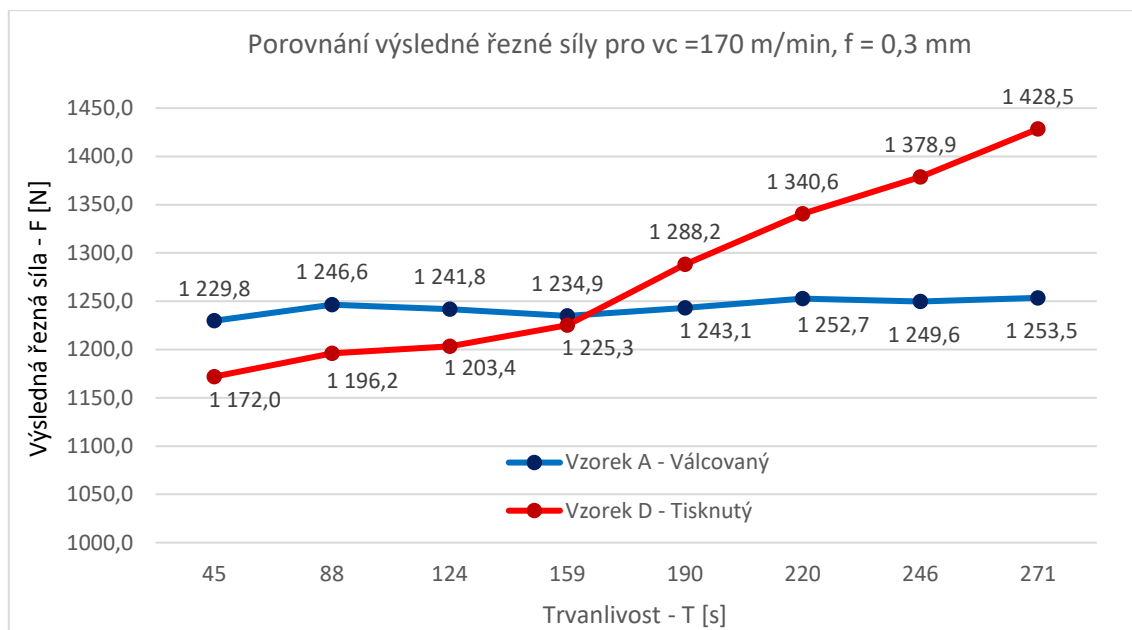
Obrázek 40 – Foto opotřebení nástroje po obrábění válcovaného vzorku A síly při $v_c = 170 \text{ m/min}$, $f = 0,25 \text{ mm}$ po 8. řezu



Obrázek 41 – Foto opotřebení nástroje po obrábění tištěného vzorku D síly při $v_c = 170 \text{ m/min}$, $f = 0,25 \text{ mm}$ po 8. řezu

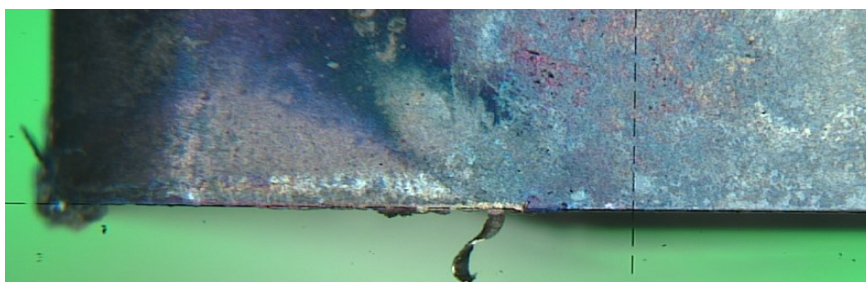
Tabulka 14 - Složky řezných sil při obrábění válcovaného vzorku A a tištěného vzorku D, při posuvu 0,3 mm

					Vzorek A	Vzorek D		
Rychlost	Posuv	Trvanlivost	Řez	Složka síly	Velikost složky síly	Velikost složky síly		
$m \cdot min^{-1}$	mm	s	-	-	N	N		
170	0,3	45	1	Fp	245,7	241,5		
				Fc	-1152	-1089		
				Ff	353,5	359,6		
				F	1229,8	1172,0		
		88	2	Fp	252,1	258,9		
				Fc	-1164	-1105		
				Ff	368,1	377,8		
				F	1246,6	1196,2		
		124	3	Fp	254,3	279,9		
				Fc	-1157	-1106		
				Ff	372,4	382,9		
				F	1241,8	1203,4		
		159	4	Fp	257,8	323,4		
				Fc	-1149	-1114		
				Ff	371,9	394,8		
				F	1234,9	1225,3		
		190	5	Fp	258,7	394,7		
				Fc	-1155	-1149		
				Ff	379,8	428,3		
				F	1243,1	1288,2		
		220	6	Fp	260,3	425,9		
				Fc	-1163	-1182		
				Ff	385,8	467,6		
				F	1252,7	1340,6		
		246	7	Fp	264,3	467,7		
				Fc	-1158	-1201		
				Ff	388,1	490		
				F	1249,6	1378,9		
		271	8	Fp	263,6	496,1		
				Fc	-1161	-1234		
				Ff	392,3	521,2		
				F	1253,5	1428,5		
						Průměr F	1244,0	1279,1



Graf 2 - Porovnání průměrných velikostí výsledné řezné síly při $v_c = 170 \text{ m/min}$, $f = 0,3 \text{ mm}$

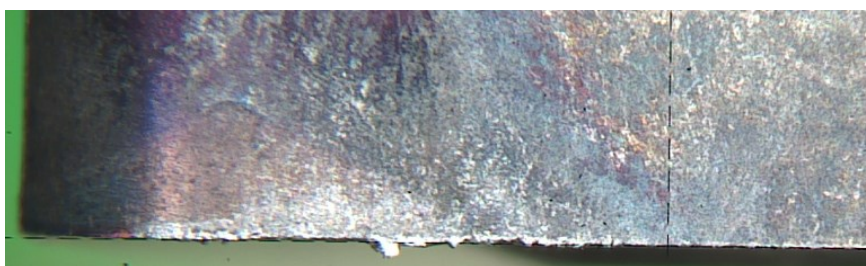
V grafu 2 je možné sledovat, že řezná síla při posuvu $0,3 \text{ mm}$ byla při prvních třech řezech vyšší při obrábění válcovaného vzorku A o několik desítek Newtonů než u obrábění tištěného vzorku D. Při čtvrtém řezu se řezné síly téměř srovnali a od tohoto řezu až do posledního se povaha grafu změnila a vyšší hodnoty vykazovala řezná síla při obrábění tištěného vzorku D, přičemž při posledním řezu byla průměrná velikost řezné síly u tohoto vzorku vyšší přibližně o 175 N . To bylo zapříčiněno několika faktory, včetně vyšších hodnot teplot při obrábění tištěného vzorku a tím většího tepelného ovlivnění a rychlejšího opotřebení řezného nástroje. Při obrábění tištěné oceli došlo při posledním řezu k vyštípnutí špičky břitu nástroje (viz Obr. 43), čemuž předcházela tvorba nárůstku na čele nástroje (Obr. 42), proto zde byla trvanlivost nástroje 271 s . Při obrábění válcované oceli nedošlo k významnějšímu opotřebení nástroje (Obr. 44), a tímto nástrojem by se tak mohlo dále obrábět.



Obrázek 42 - Nárůstek vzniklý na čele nástroje při obrábění tištěného vzorku D při řezné rychlosti $v_c = 170 \text{ m/min}$ a posuvu $f = 0,3 \text{ mm}$, po 7. řezu



Obrázek 43 - Opotřebení nástroje po obrábění tištěného vzorku D při řezné rychlosti $v_c = 170 \text{ m/min}$ a posuvu $f = 0,3 \text{ mm}$

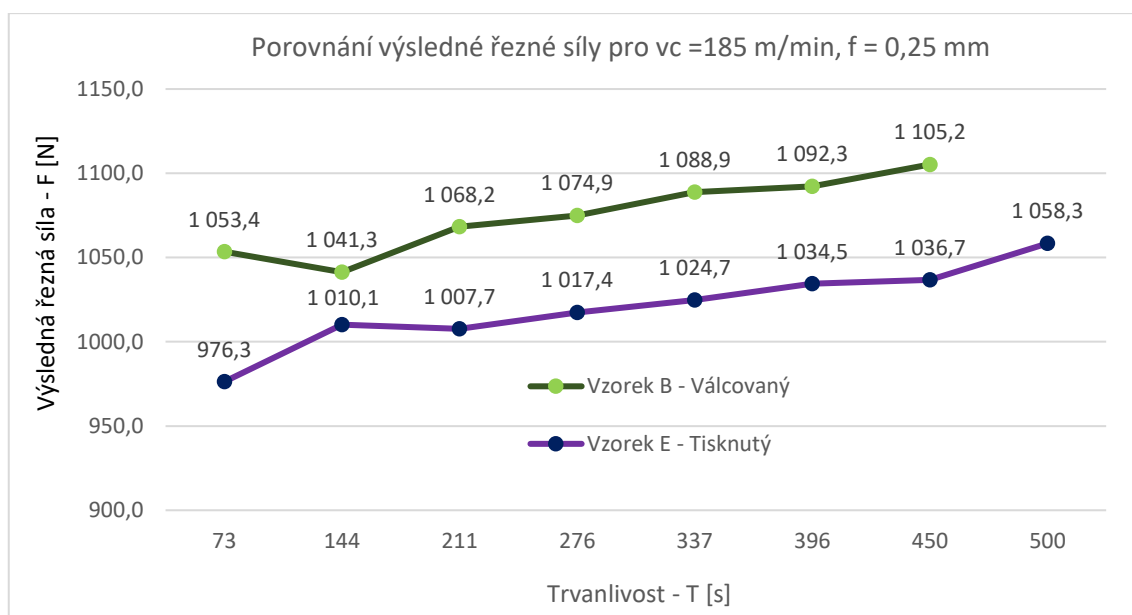


Obrázek 44 - Opotřebení nástroje po obrábění válcovaného vzorku A při řezné rychlosti $v_c = 170 \text{ m/min}$ a posuvu $f = 0,3 \text{ mm}$

5.1.2 Porovnání řezných sil a opotřebení vzorku B se vzorkem E

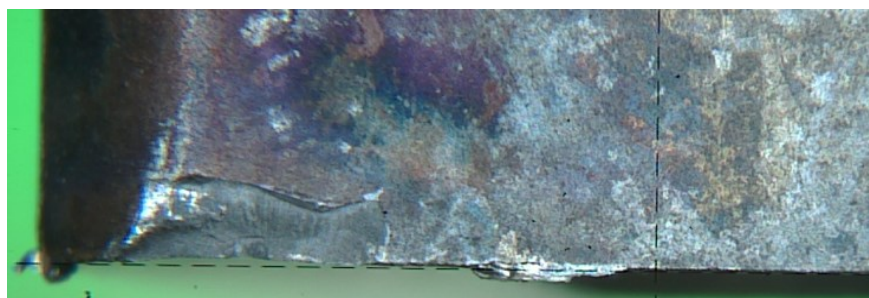
Tabulka 15 - Složky řezných sil při obrábění válcovaného vzorku B a tištěného vzorku E, při posuvu 0,25 mm

					Vzorek B	Vzorek E		
Rychlost	Posuv	Trvanlivost (vzorek B/E)	Řez	Složka síly	Velikost složky síly	Velikost složky síly		
$m \cdot min^{-1}$	mm	s	-	-	N	N		
185	0,25	73 / 73	1	Fp	208,9	210,4		
				Fc	-971,7	-902,7		
				Ff	349,1	306,6		
				F	1053,4	976,3		
		144 / 144	2	Fp	218,5	216		
				Fc	-963,8	-932,9		
				Ff	328,1	321,5		
				F	1041,3	1010,1		
		211 / 211	3	Fp	227,5	217,8		
				Fc	-988,6	-929,1		
				Ff	334,7	323,6		
				F	1068,2	1007,7		
		276 / 276	4	Fp	232,4	221,2		
				Fc	-992,5	-936,7		
				Ff	341	329,7		
				F	1074,9	1017,4		
		337 / 337	5	Fp	243,3	224,5		
				Fc	-1002	-941		
				Ff	350	337,9		
				F	1088,9	1024,7		
		396 / 396	6	Fp	263,7	228,7		
				Fc	-1000	-946,4		
				Ff	351,5	349,5		
				F	1092,3	1034,5		
		450 / 452	7	Fp	300,1	232		
				Fc	-1004	-946,4		
				Ff	351,3	354		
				F	1105,2	1036,7		
		- / 500	8	Fp		240,2		
				Fc		-960,7		
				Ff		373,4		
				F		1058,3		
						Průměr F	1074,9	1020,7



Graf 3 – Porovnání průměrných velikostí výsledné řezné síly při $v_c = 185 \text{ m/min}$, $f = 0,25 \text{ mm}$

Válcovanému vzorku B a tištěnému vzorku E náleží řezná rychlost $185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. V grafu 3 pro řezné síly při posuvu $0,25 \text{ mm}$ je patrné, že průměrné velikosti celkové řezné síly při obrábění válcovaného vzorku byly vyšší než při obrábění tištěného vzorku. Vyšší hodnoty průměrných řezných sil dosažené při obrábění válcované oceli společně s dalšími faktory (teplota, vibrace apod.) dokonce vedli k porušení břitů nástroje již při sedmém řezu, kde bylo měření ukončeno (viz Obr. 45) a trvanlivost břitové destičky tak dosáhla 450 s. Vyměnitelná břitová destička při obrábění tištěné oceli nevykazovala výrazné opotřebení ani po osmém řezu (viz Obr. 46), proto by se dala použít k dalšímu obrábění.



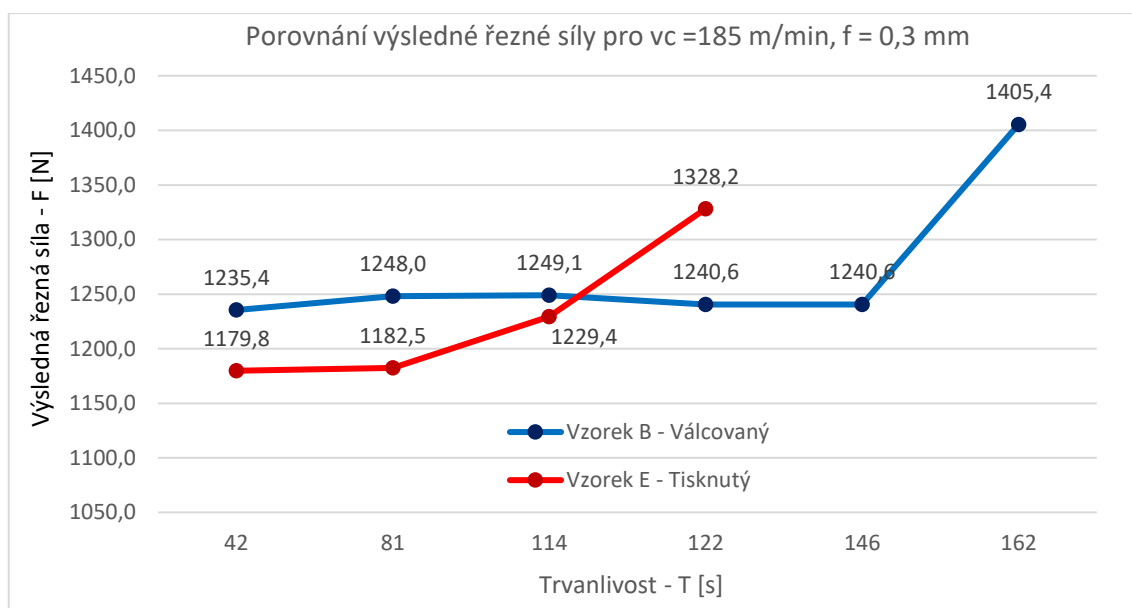
Obrázek 45 - Opotřebení nástroje po obrábění válcovaného vzorku B při $v_c = 185 \text{ m/min}$ a $f = 0,25 \text{ mm}$ po 7. řezu



Obrázek 46 - Opotřebení nástroje po obrábění tištěného vzorku E při $v_c = 185 \text{ m/min}$ a $f = 0,25 \text{ mm}$

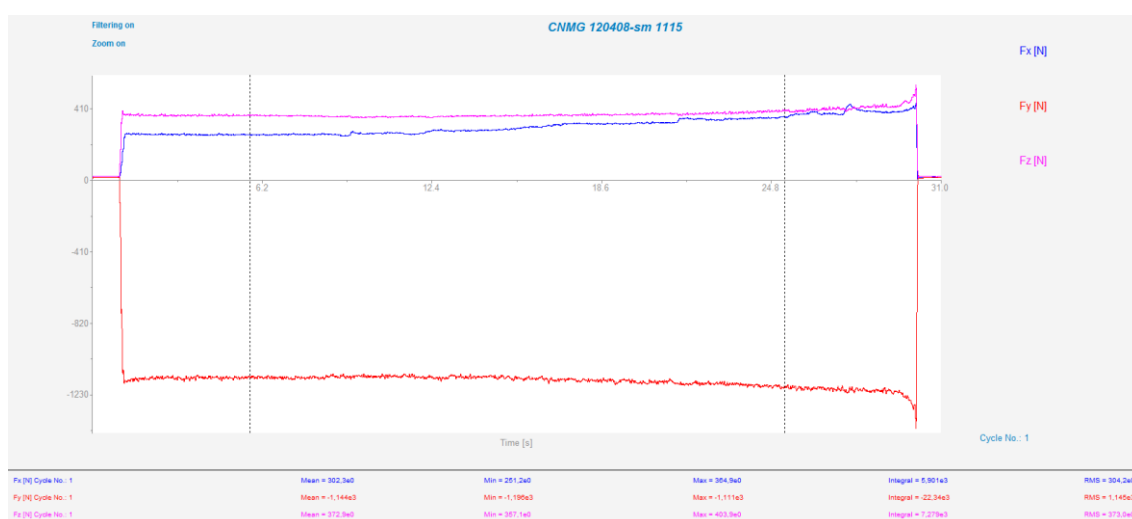
Tabulka 16 - Složky řezných sil při obrábění válcovaného vzorku B a tištěného vzorku E, při posuvu 0,3 mm

					Vzorek B	Vzorek E
Rychlost	Posuv	Trvanlivost (vzorek B/E)	Řez	Složka síly	Velikost složky síly	Velikost složky síly
$m \cdot min^{-1}$	mm	s	-	-	N	N
185	0,3	42 / 42	1	Fp	248,7	247,3
				Fc	-1150	-1096
				Ff	376,5	360
				F	1235,4	1179,8
		81 / 81	2	Fp	265,4	272,3
				Fc	-1157	-1091
				Ff	385,1	365,8
				F	1248,0	1182,5
		114 / 114	3	Fp	269,6	329,5
				Fc	-1157	-1117
				Ff	385,8	393,9
				F	1249,1	1229,4
		146 / 122	4	Fp	302,3	436,5
				Fc	-1144	-1172
				Ff	372,9	447,1
				F	1240,6	1328,2
		162 / -	5	Fp	403,9	
				Fc	-1258	
				Ff	479	
				F	1405,4	
Průměr F				1275,7	1230,0	



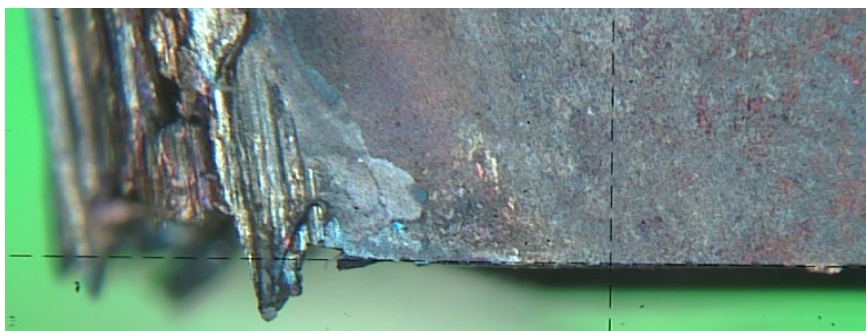
Graf 4- Porovnání průměrných velikostí výsledné řezné síly při $v_c = 185 \text{ m/min}$, $f = 0,3 \text{ mm}$

Graf 4 znázorňuje průměrnou velikost výsledných řezných sil při řezné rychlosti $185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu $0,3 \text{ mm}$, která byla u prvních dvou řezů nižší při obrábění vzorku E z tištěné oceli. Při třetím řezu průměrná velikost řezné síly při obrábění tištěného vzorku vzrostla a téměř se vyrovnala velikosti řezné síly při obrábění válcovaného vzorku. Během čtvrtého řezu došlo při obrábění tištěného vzorku E k výraznému nárůstu průměrné velikosti výsledné řezné síly a porušení břitu nástroje (Obr. 48). Trvanlivost břitu dosáhla 122 s. U vzorku B se během prvních čtyř řezů průměrná velikost výsledné řezné síly držela na přibližně stejné hodnotě. Po čtvrtém řezu byl na břitové destičce detekován nárůstek (Obr. 49) na břitu a špičce břitu nástroje a z grafu řezných sil na Obr. 47 bylo možné vypočítat lehké zvýšení posuvové složky řezné síly. Zde se dalo předpokládat brzké opotřebení břitové destičky což následovalo během pátého řezu, kde došlo k vylomení břitu řezného nástroje (Obr. 50) a trvanlivost nástroje zde činila 162 s.

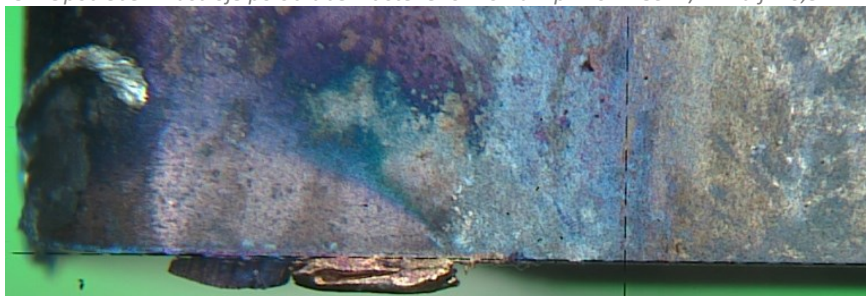


Obrázek 47 - Vyhodnocení složek řezných sil v softwaru Dynoware pro vzorek B; $v_c = 185$; $f = 0,3$; 4. řez

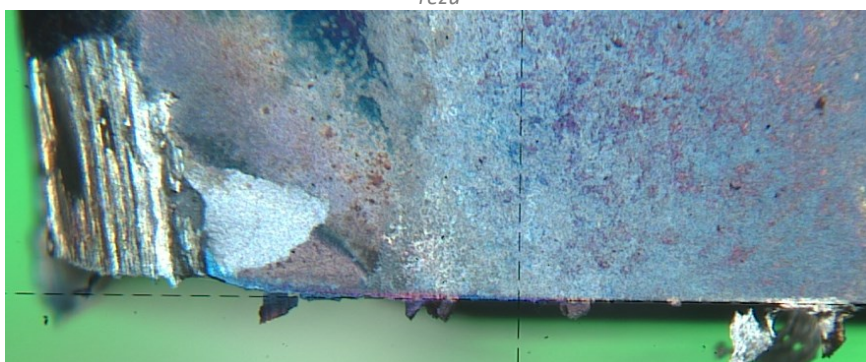
$F_p \text{ mean} = 302,3 \text{ N}$ $F_p \text{ min} = 251,2 \text{ N}$ $F_p \text{ max} = 364,9 \text{ N}$ $F_p \text{ integral} = 5 901 \text{ N}$ $F_p \text{ RMS} = 304,2 \text{ N}$
 $F_c \text{ mean} = -1 144 \text{ N}$ $F_c \text{ min} = -1 196 \text{ N}$ $F_c \text{ max} = -1 111 \text{ N}$ $F_c \text{ integral} = -2 234 \text{ N}$ $F_c \text{ RMS} = 1 145 \text{ N}$
 $F_f \text{ mean} = 372,9 \text{ N}$ $F_f \text{ min} = 357,1 \text{ N}$ $F_f \text{ max} = 403,9 \text{ N}$ $F_f \text{ integral} = 7 279 \text{ N}$ $F_f \text{ RMS} = 373 \text{ N}$



Obrázek 48 – Opotřebení nástroje po obrábění tištěného vzorku E při $vc = 185 \text{ m/min}$ a $f = 0,3 \text{ mm}$ po 4. řezu



Obrázek 49 – Nárůstek na břitu nástroje po obrábění válcovaného vzorku B při $vc = 185 \text{ m/min}$ a $f = 0,3 \text{ mm}$ po 4. řezu

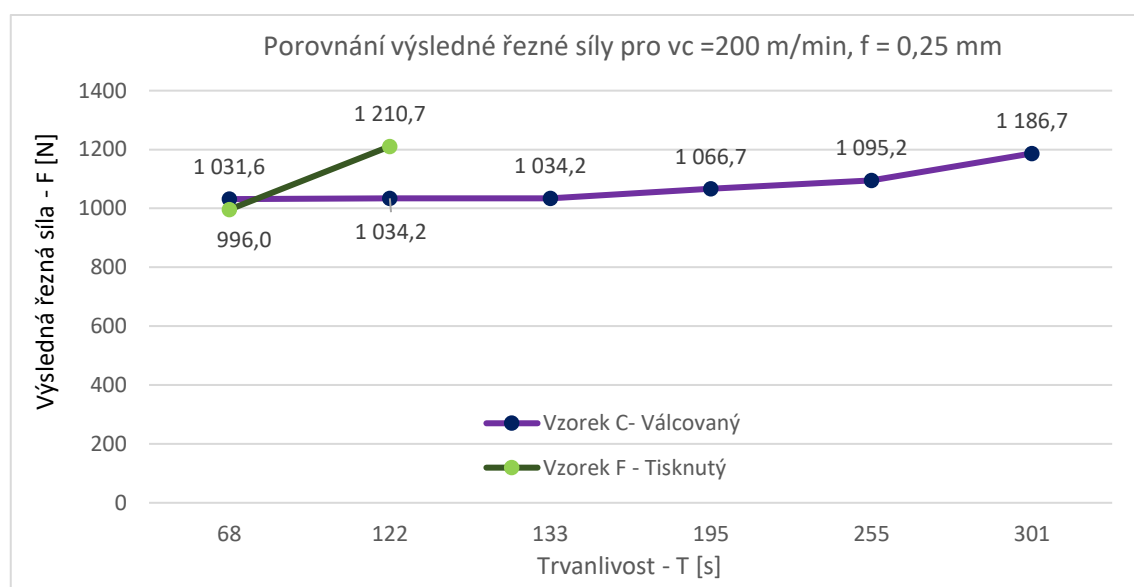


Obrázek 50 - Opotřebení nástroje po obrábění válcovaného vzorku E při $vc = 185 \text{ m/min}$ a $f = 0,3 \text{ mm}$ po 5. řezu

5.1.3 Porovnání řezných sil a opotřebení vzorku C se vzorkem F

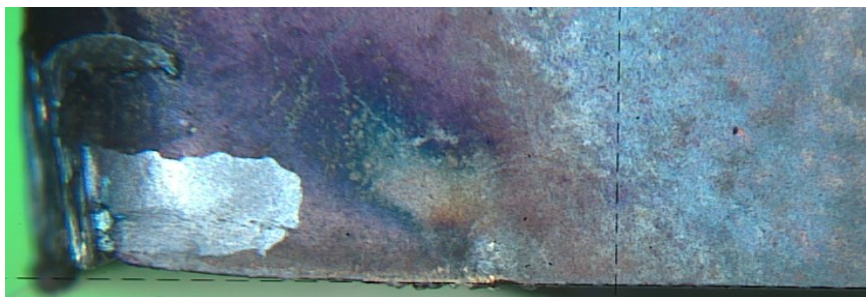
Tabulka 17 - Složky řezných sil při obrábění válcovaného vzorku C a tištěného vzorku F, při posuvu 0,25 mm

					Vzorek C	Vzorek F
Rychlost	Posuv	Trvanlivost (vzorek C/F)	Řez	Složka síly	Velikost složky síly	Velikost složky síly
$m \cdot min^{-1}$	mm	s	-	-	N	N
200	0,25	68 / 68	1	Fp	207,4	220
				Fc	-955,9	-915,9
				Ff	327,8	323,5
				F	1031,6	996,0
		133 / 122	2	Fp	219,3	494,6
				Fc	-960,9	-1028
				Ff	313,3	405,3
				F	1034,2	1210,7
		195 / -	3	Fp	230,8	
				Fc	-987,3	
				Ff	331,4	
				F	1066,7	
		255 / -	4	Fp	299,5	
				Fc	-997,8	
				Ff	337,8	
				F	1095,2	
		301 / -	5	Fp	410	
				Fc	-1043	
				Ff	390,2	
				F	1186,7	
						Průměr F



Graf 5 - Porovnání průměrných velikosti výsledné řezné síly při $v_c = 200 \text{ m/min}$, $f = 0,25 \text{ mm}$

Na Grafu 5 kterému náleží řezná rychlost $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuv $0,25 \text{ mm}$ je možné sledovat, že při obrábění tištěného vzorku F byla průměrná velikost výsledné řezné síly při prvním řezu nižší přibližně o 35 N než při obrábění válcovaného vzorku C, ale v následném (druhém) řezu se razantně zvýšila a následovalo vylomení břitu nástroje (Obr. 51). Tato VBD dosáhla trvanlivosti pouhých 122 s . Trvanlivost nástroje při obrábění válcovaného vzorku převýšila svojí životností břitovou destičku při obrábění tištěného vzorku o více než polovinu. Ke značnému opotřebení došlo až při pátém řezu, kdy se vylomil břit nástroje (Obr. 52) a VBD tak dosáhla trvanlivosti 301 s .



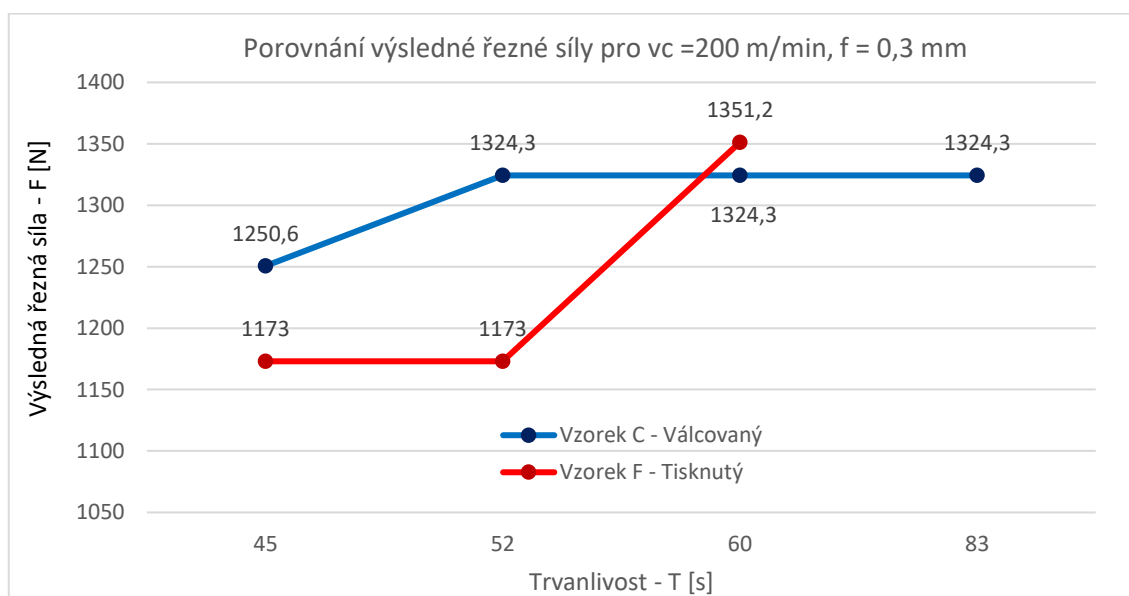
Obrázek 51 - Opotřebení nástroje po obrábění válcovaného vzorku C při $vc = 200 \text{ m/min}$ a $f = 0,25 \text{ mm}$ po 5. řezu



Obrázek 52 - Opotřebení nástroje po obrábění tištěného vzorku F při $vc = 200 \text{ m/min}$ a $f = 0,25 \text{ mm}$ po 2. řezu

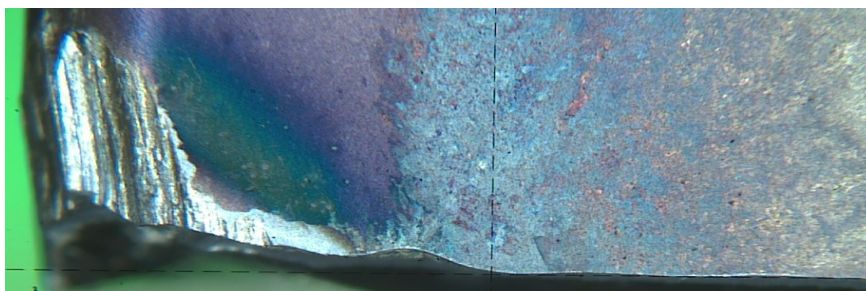
Tabulka 18 - Složky řezných sil při obrábění válcovaného vzorku C a tištěného vzorku F, při posuvu 0,25 mm

					Vzorek C	Vzorek F
Rychlost	Posuv	Trvanlivost (vzorek C/F)	Řez	Složka síly	Velikost složky síly	Velikost složky síly
$m \cdot min^{-1}$	mm	s	-	-	N	N
200	0,3	45 / 52	1	Fp	254,6	258,2
				Fc	-1170	-1091
				Ff	360,8	344,8
				F	1250,6	1173,0
		83 / 60	2	Fp	342,7	480,6
				Fc	-1217	-1180
				Ff	394,1	450
				F	1324,3	1351,2
Průměr F				1287,4	1262,1	



Graf 6 - Porovnání průměrných velikostí výsledné řezné síly při $v_c = 200 \text{ m/min}$, $f = 0,3 \text{ mm}$

U grafu 6 je specifická řezná rychlost $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuv 0,3 mm. Zde byla trvanlivost nástroje při obrábění tištěného vzorku F pouze 60 s, přičemž při prvním řezu, byla průměrná výsledná řezná síla o přibližně 75 N nižší než při obrábění válcovaného vzorku. Při druhém řezu došlo k razantnímu nárůstu průměrné výsledné řezné síly a vyštípnutí břitu nástroje, což je zobrazeno na Obr. 53. Při druhém řezu válcovaného vzorku také došlo k nárůstu průměrné výsledné řezné síly a k následnému vyštípnutí špičky břitu nástroje (obr. 54). Tato nízká trvanlivost obou destiček byla zapříčiněna vysokou řeznou rychlostí a posuvem, čímž byly způsobeny vyšší řezné síly, vysoké teploty v místě řezu (tepelné ovlivnění řezného nástroje a obrobku a tím způsobené zpevňování povrchové vrstvy obráběného materiálu a křehnutí nástroje), vibrace a další aspekty. Na snímcích destiček po vyštípnutí břitu nástroje jsou vidět modré až zelené a také fialové zóny což svědčí o značném vyhřátí VBD.



Obrázek 53 - Opotřebení nástroje po 60s obrábění tištěného vzorku F při $v_c = 200 \text{ m/min}$ a $f = 0,3 \text{ mm}$

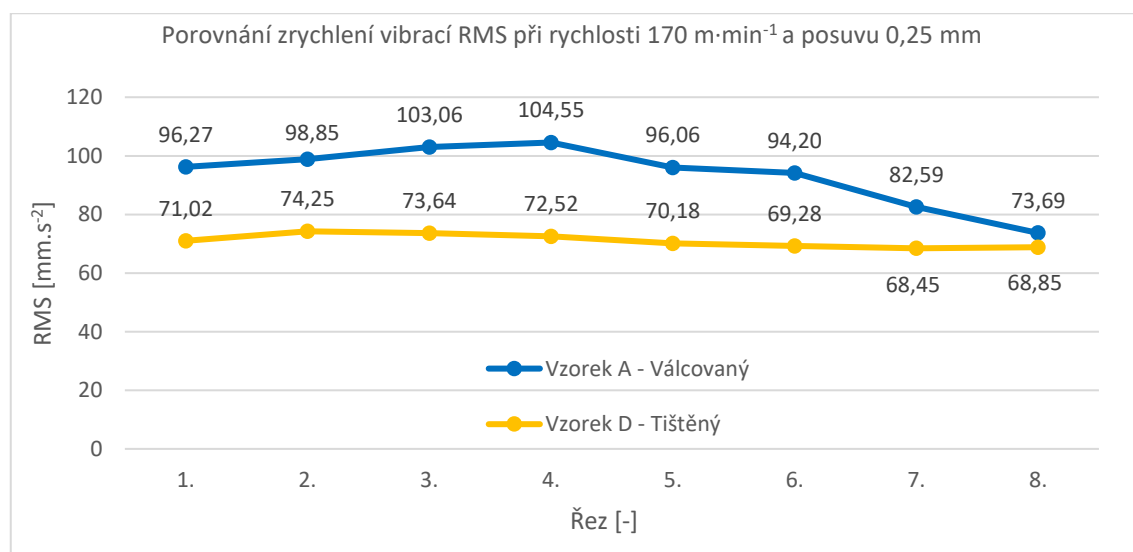


Obrázek 54 - Opotřebení nástroje po 83s obrábění válcovaného vzorku C při $v_c = 200 \text{ m/min}$ a $f = 0,3 \text{ mm}$

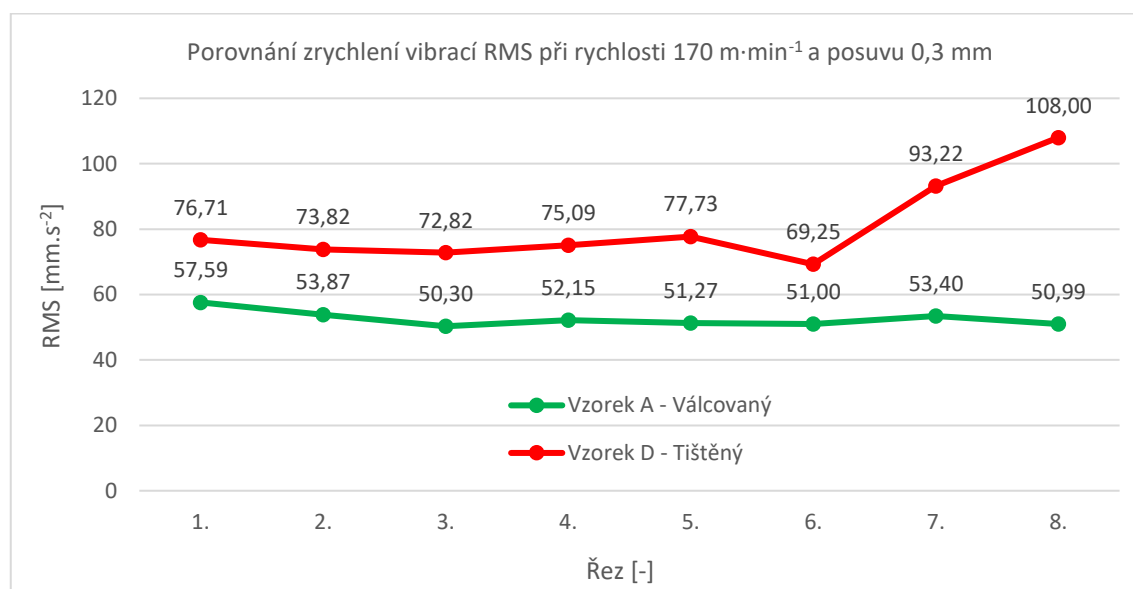
5.2 Porovnání vibrací

Výsledná hodnota zrychlení vibrací RMS byla vypočítána z jednotlivých naměřených hodnot podle vzorce (3.1) a za pomoci tabulkového procesoru Microsoft Excel 365. Průběh výsledného zrychlení vibrací během jednotlivých řezů za daných řezných podmínek byl zaznamenán do grafů. Válcované vzorky při posuvu 0,25 mm byly značeny modrou barvou, tištěné vzorky oranžovou barvou. Při posuvu 0,3 mm byly válcované vzorky značeny zeleně a tištěné červeně. Na osu X zde bylo naneseno číslo řezu [-] a na osu Y výsledná hodnota zrychlení vibrací RMS [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$].

5.2.1 Porovnání průběhu vibrací vzorku A se vzorkem D

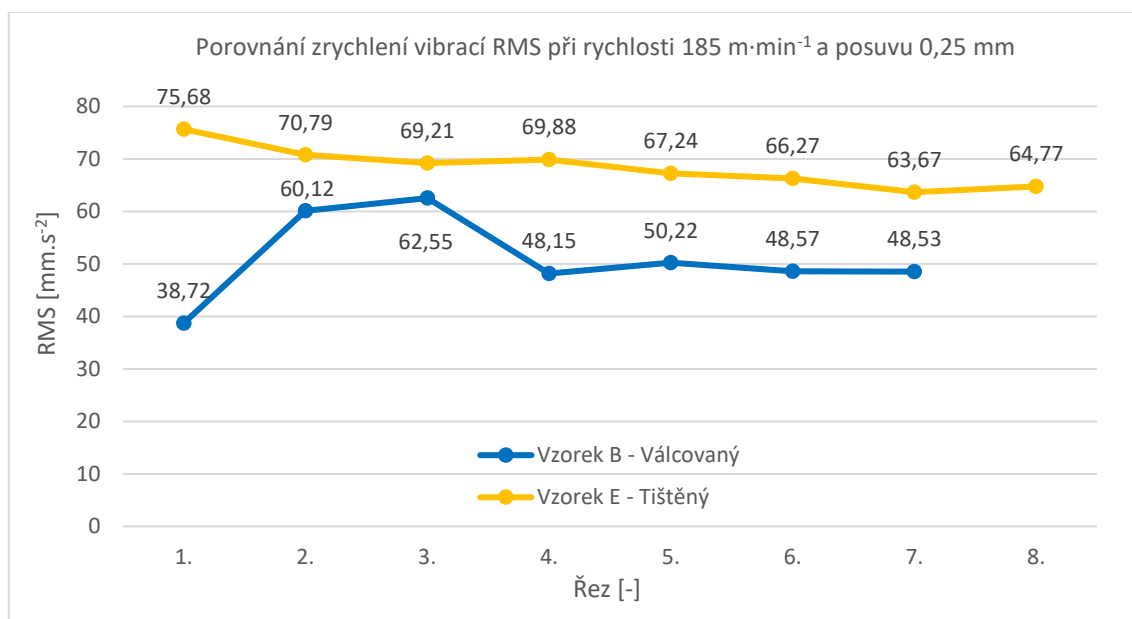


Graf 7 - Porovnání průběhu výsledného zrychlení vibrací při řezné rychlosti $170 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu 0,25 mm

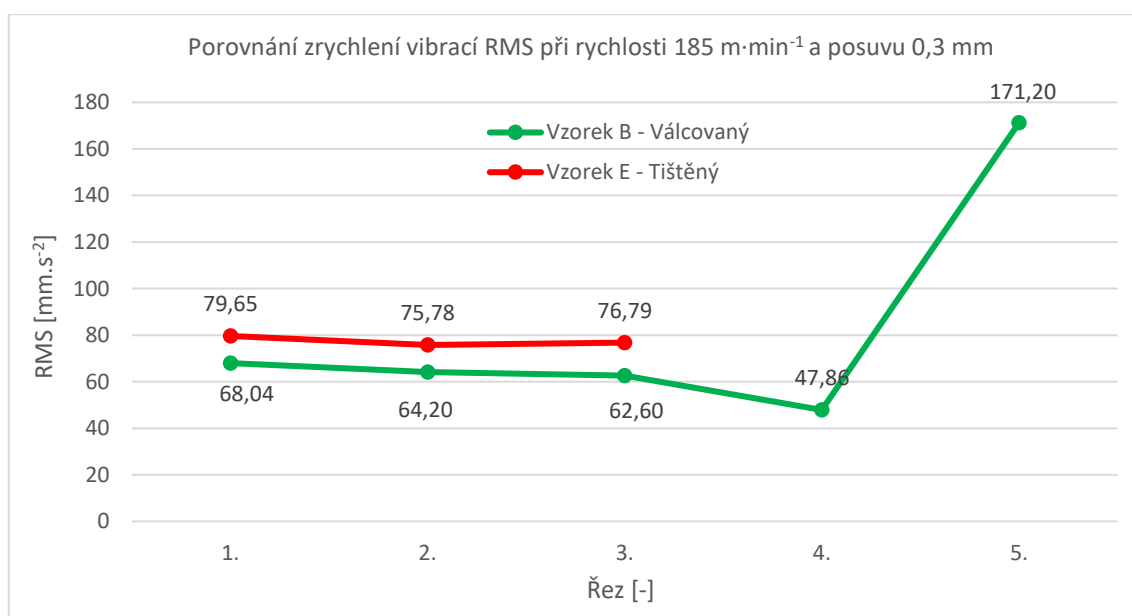


Graf 8 - Porovnání průběhu výsledného zrychlení vibrací při řezné rychlosti $170 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu 0,3 mm

5.2.2 Porovnání průběhu vibrací vzorku B se vzorkem E

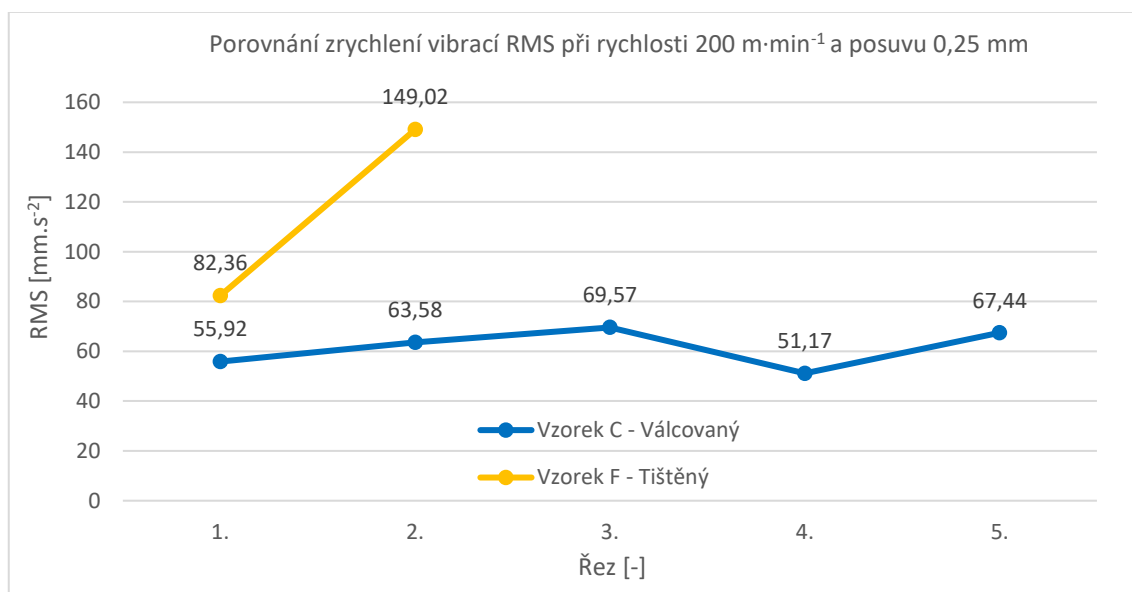


Graf 9 - Porovnání průběhu výsledného zrychlení vibrací při řezné rychlosti $185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu $0,25 \text{ mm}$

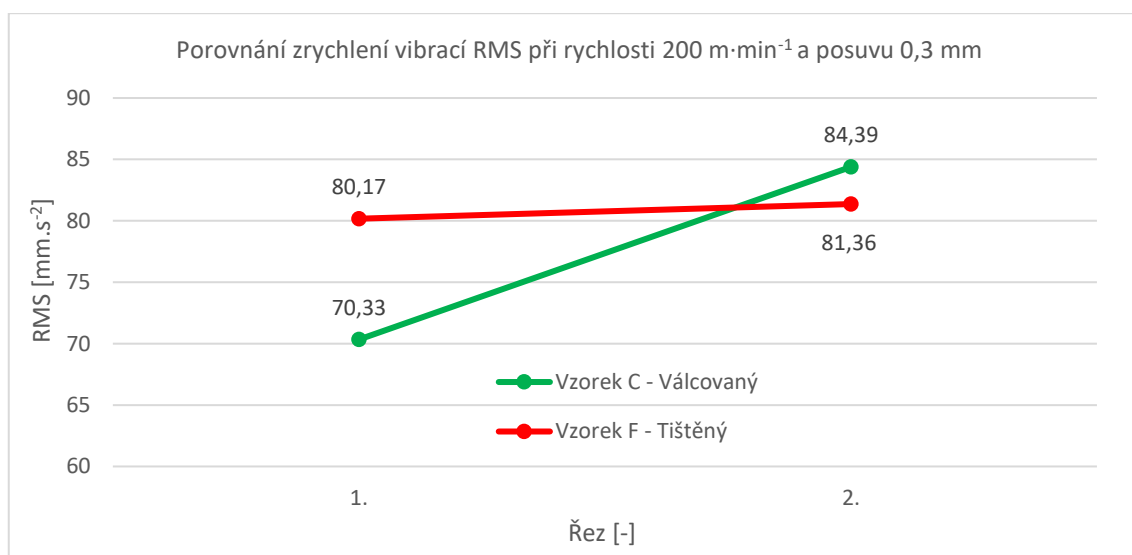


Graf 10 - Porovnání průběhu výsledného zrychlení vibrací při řezné rychlosti $185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu $0,3 \text{ mm}$

5.2.3 Porovnání průběhu vibrací vzorku C se vzorkem F



Graf 11 - Porovnání průběhu výsledného zrychlení vibrací při řezné rychlosti $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu $0,25 \text{ mm}$

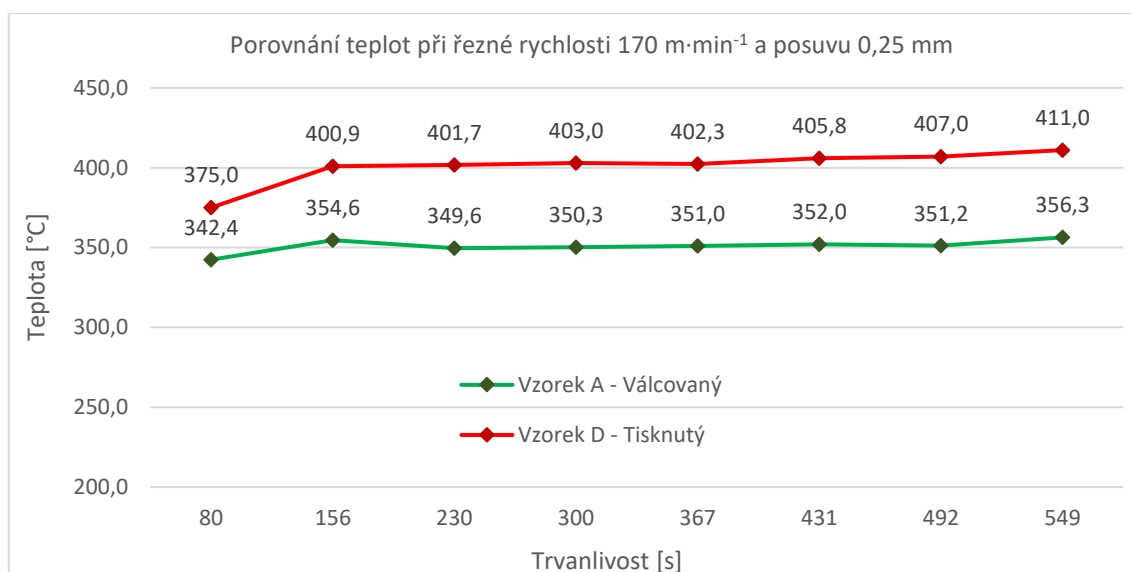


Graf 12 - Porovnání průběhu výsledného zrychlení vibrací při řezné rychlosti $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu $0,3 \text{ mm}$

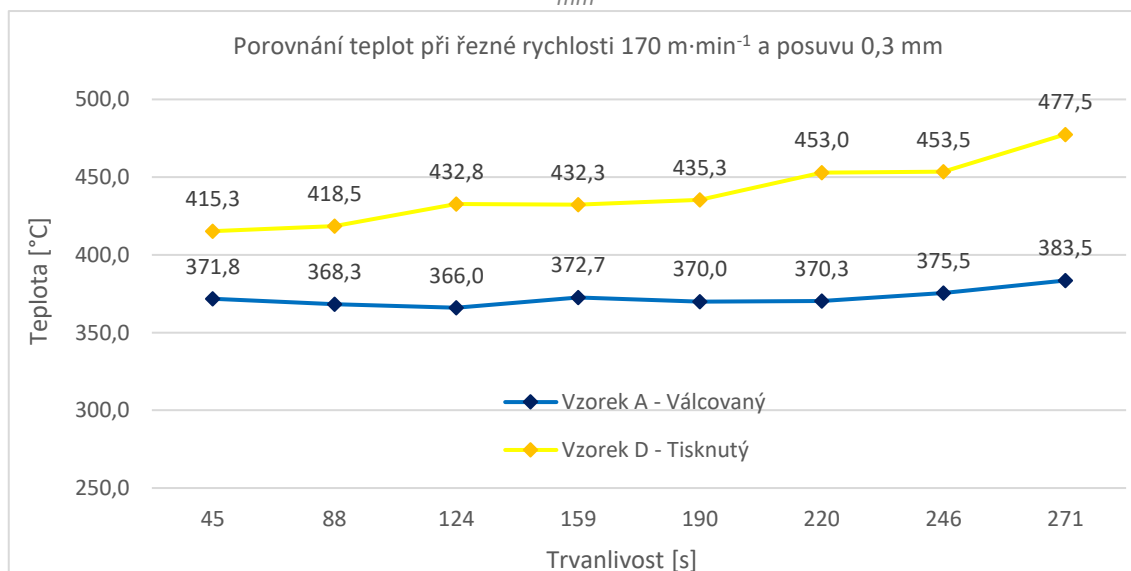
5.3 Porovnání teplot v místě styku nástroje s obrobkem

Naměřené hodnoty teplot byly dosazeny do tabulky a následně byly zprůměrovány, aby byly ve spojnicových grafech přehledně porovnány průběhy vývoje teplot. Všechny grafy byly barevně rozděleny. U grafů pro posuv $f = 0,25$ mm byly hodnoty teplot dosažených při obrábění válcovaných vzorků označeny zeleně a hodnoty teplot při obrábění tištěných vzorků červeně. U grafů pro posuv $f = 0,3$ mm byly hodnoty teplot dosažené při obrábění válcovaných vzorků značeny modře a hodnoty teplot při obrábění tištěných vzorků žlutě. Na osu X byla nanесena doba trvanlivosti nástroje [s] a na osu Y teplota při obrábění [°C].

5.3.1 Porovnání průběhu teplot vzorku A se vzorkem D

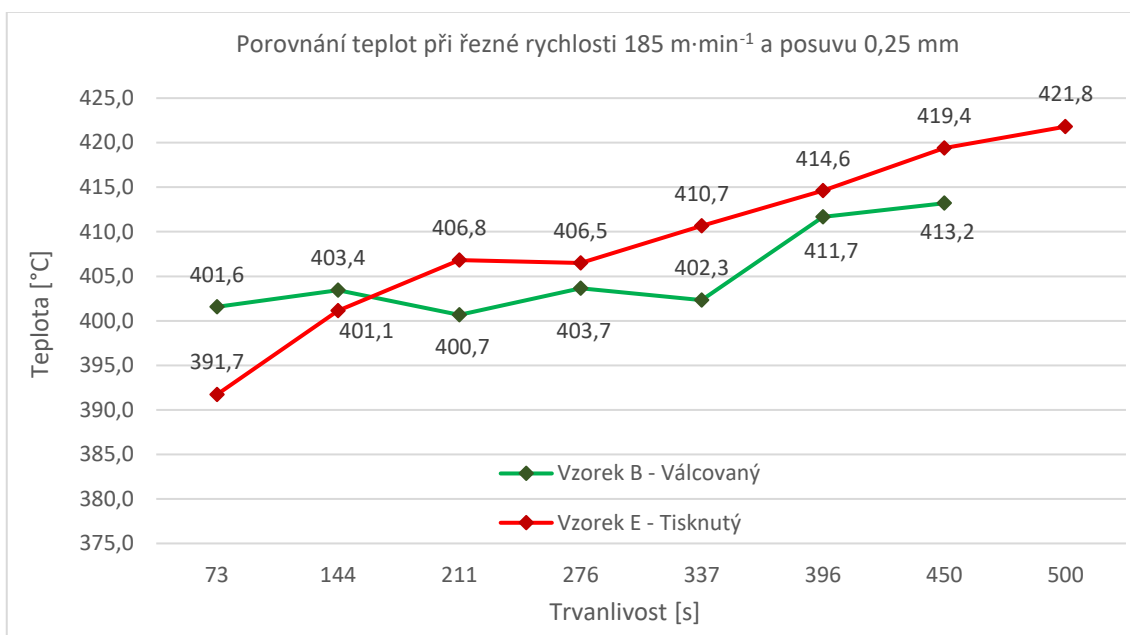


Graf 13 - Porovnání průběhu teplot v místě styku nástroje s obrobkem při řezné rychlosti $170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu $0,25 \text{ mm}$

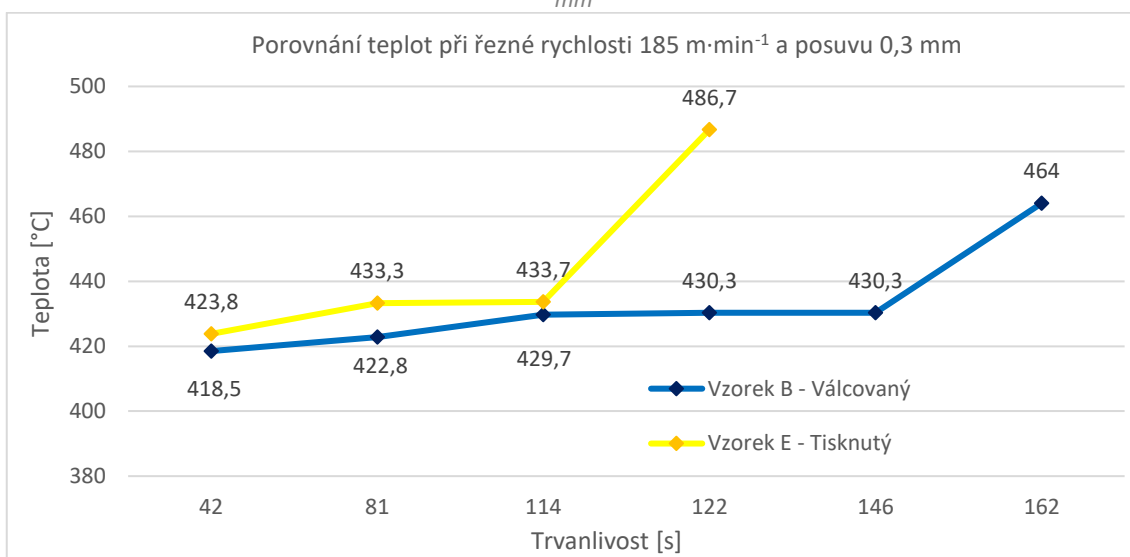


Graf 14 - Porovnání průběhu teplot v místě styku nástroje s obrobkem při řezné rychlosti $170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu $0,3 \text{ mm}$

5.3.2 Porovnání průběhu teplot vzorku B se vzorkem E

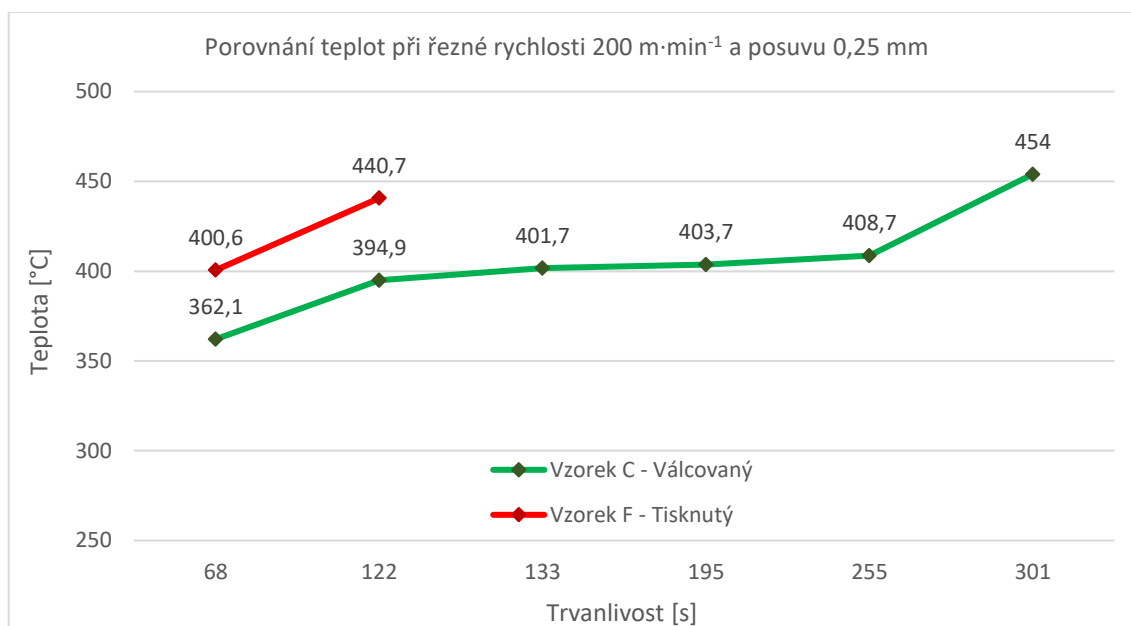


Graf 15 - Porovnání průběhu teplot v místě styku nástroje s obrobkem při řezné rychlosti $185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu $0,25 \text{ mm}$

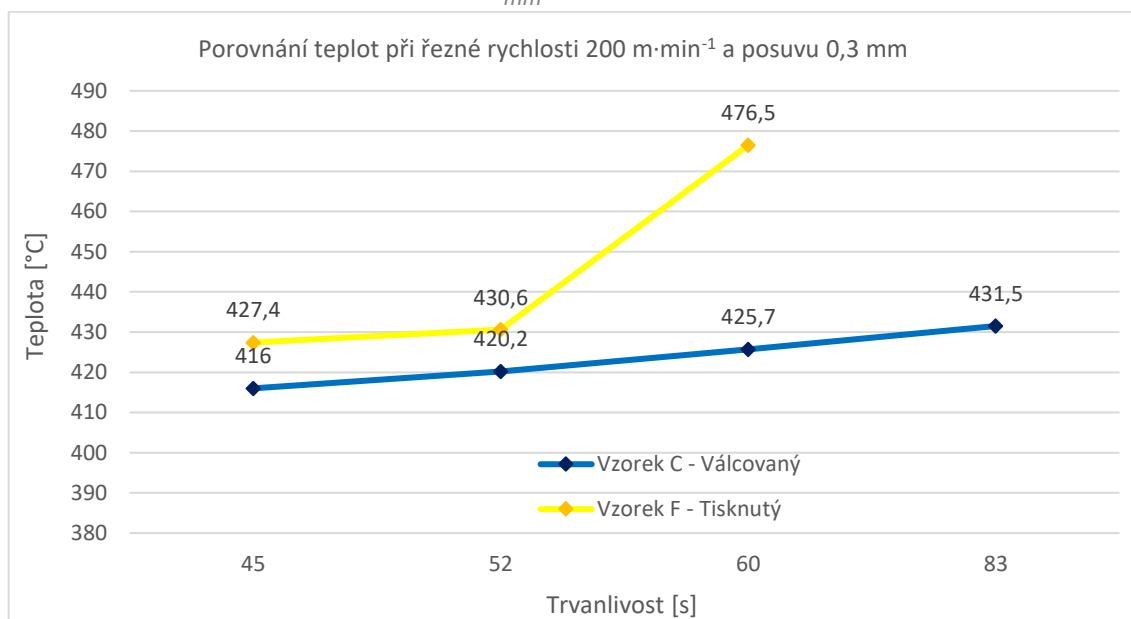


Graf 16 - Porovnání průběhu teplot v místě styku nástroje s obrobkem při řezné rychlosti $185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu $0,3 \text{ mm}$

5.3.3 Porovnání průběhu teplot vzorku C se vzorkem F



Graf 17 - Porovnání průběhu teplot v místě styku nástroje s obrobkem při řezné rychlosti $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu $0,25 \text{ mm}$

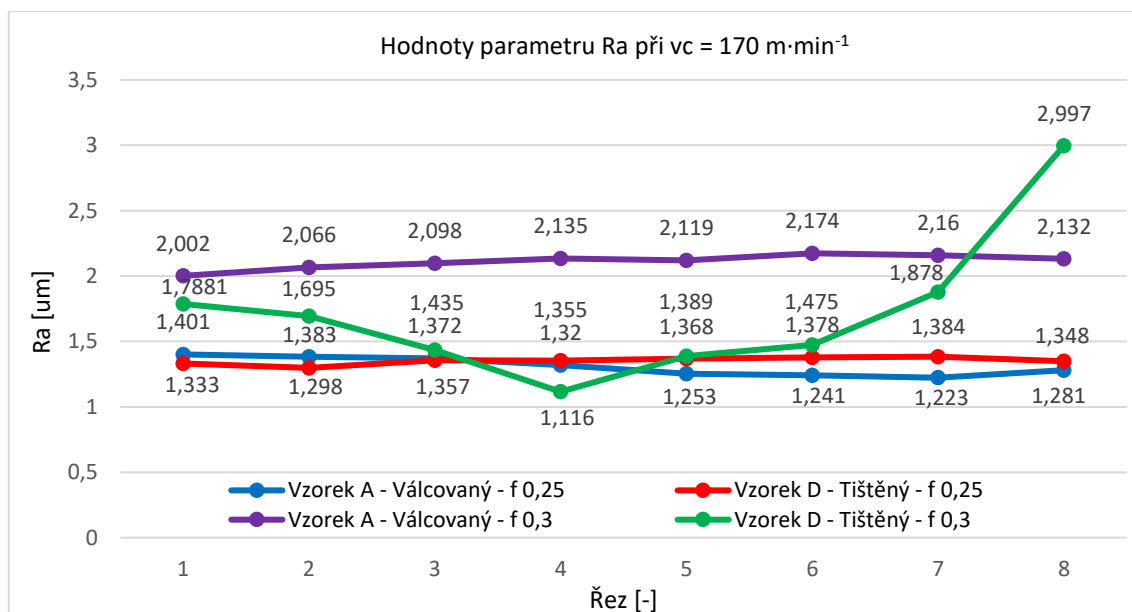


Graf 18 - Porovnání průběhu teplot v místě styku nástroje s obrobkem při řezné rychlosti $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu $0,3 \text{ mm}$

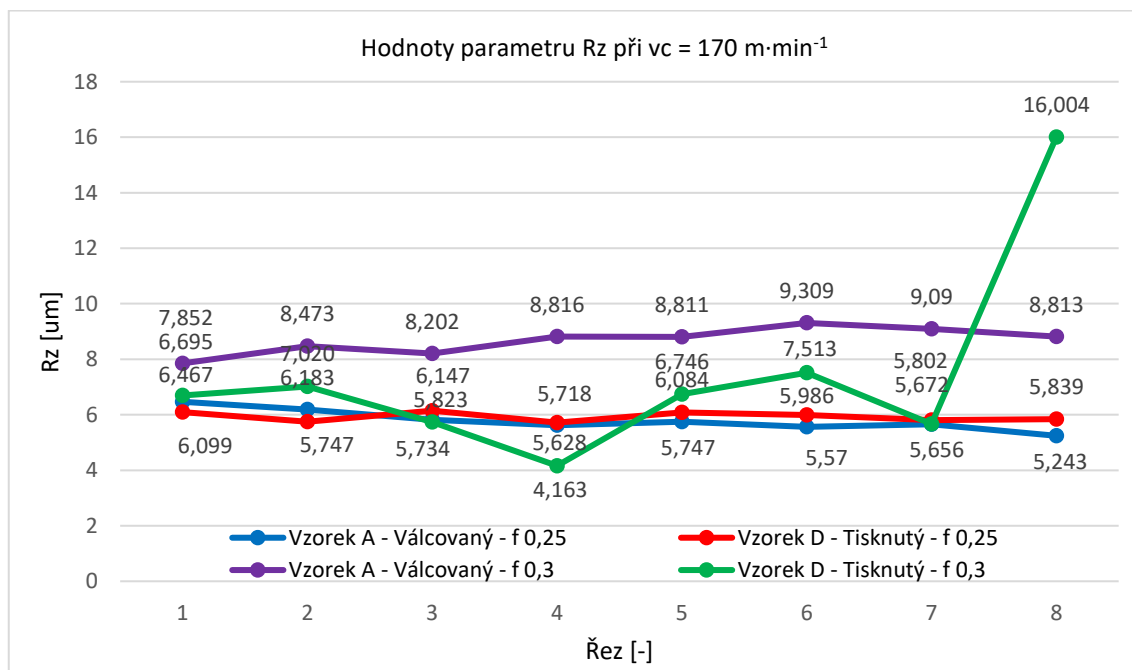
5.4 Porovnání parametrů drsnosti

Naměřené hodnoty parametrů drsnosti byly vypsány do tabulek a poté porovnány v grafech. V jednom grafu byl porovnáván jeden z parametrů $R_a - R_z$ po každém řezu, při určité řezné rychlosti a při obou hodnotách posuvu. Pro označení v těchto grafech byly zvoleny stejné, následující barvy. Pro hodnoty parametrů drsnosti při obrábění válcovaných vzorků byla zvolena modrá barva při posuvu 0,25 mm a fialová barva při posuvu 0,3 mm. Hodnoty parametrů drsnosti při obrábění tištěných vzorků byly označeny červenou barvou při posuvu 0,25 mm a zelenou barvou při posuvu 0,3 mm. Na osu X bylo naneseno číslo řezu [-] a na osu Y hodnota parametru drsnosti [μm].

5.4.1 Porovnání parametrů drsnosti R_a a R_z (vzorek A se vzorkem D)

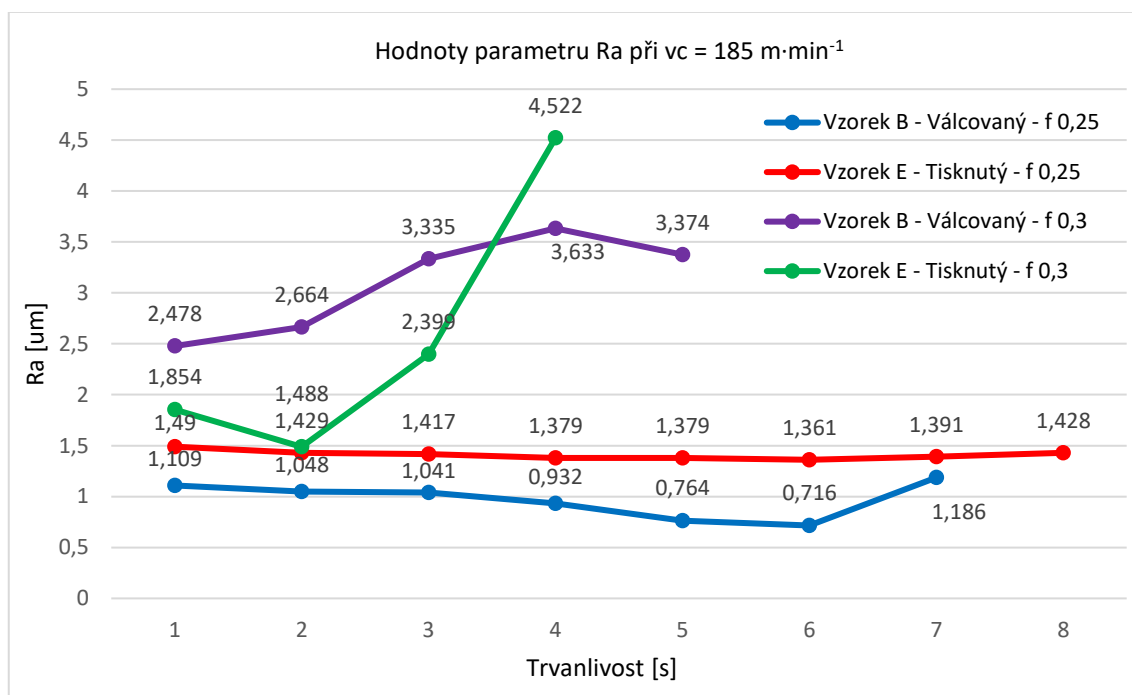


Graf 19 - Porovnání parametru drsnosti R_a po jednotlivých řezech při řezné rychlosti $170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

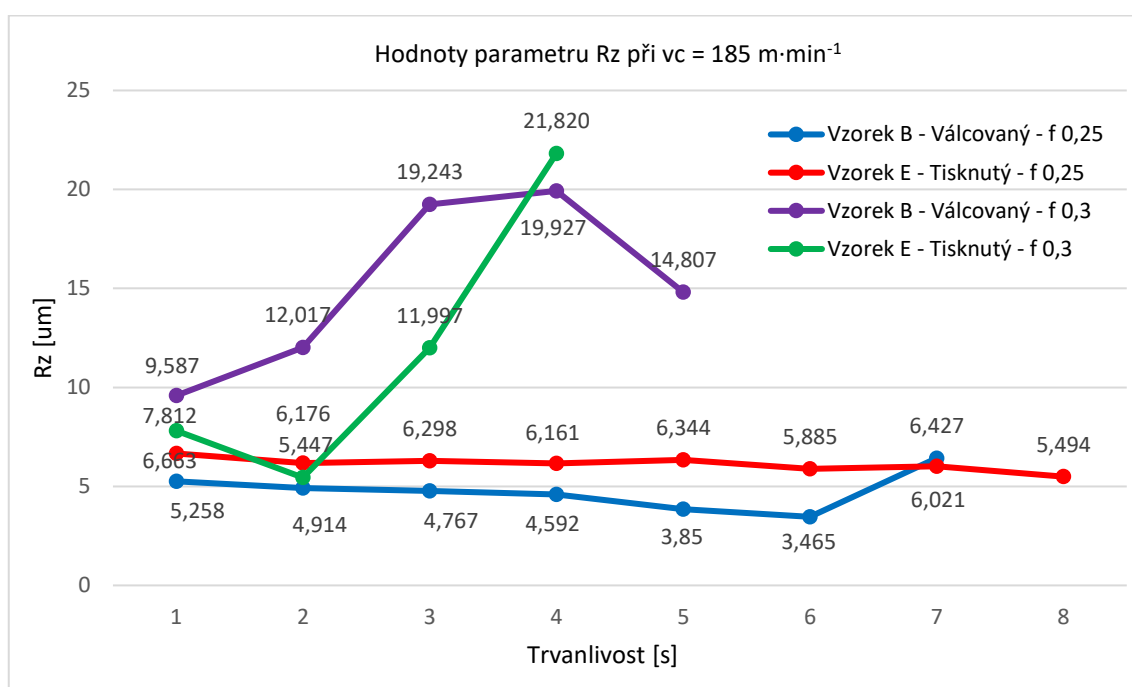


Graf 20 - Porovnání parametru drsnosti R_z po jednotlivých řezech při řezné rychlosti $170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

5.4.2 Porovnání parametru drsnosti Ra a Rz (vzorek B se vzorkem E)

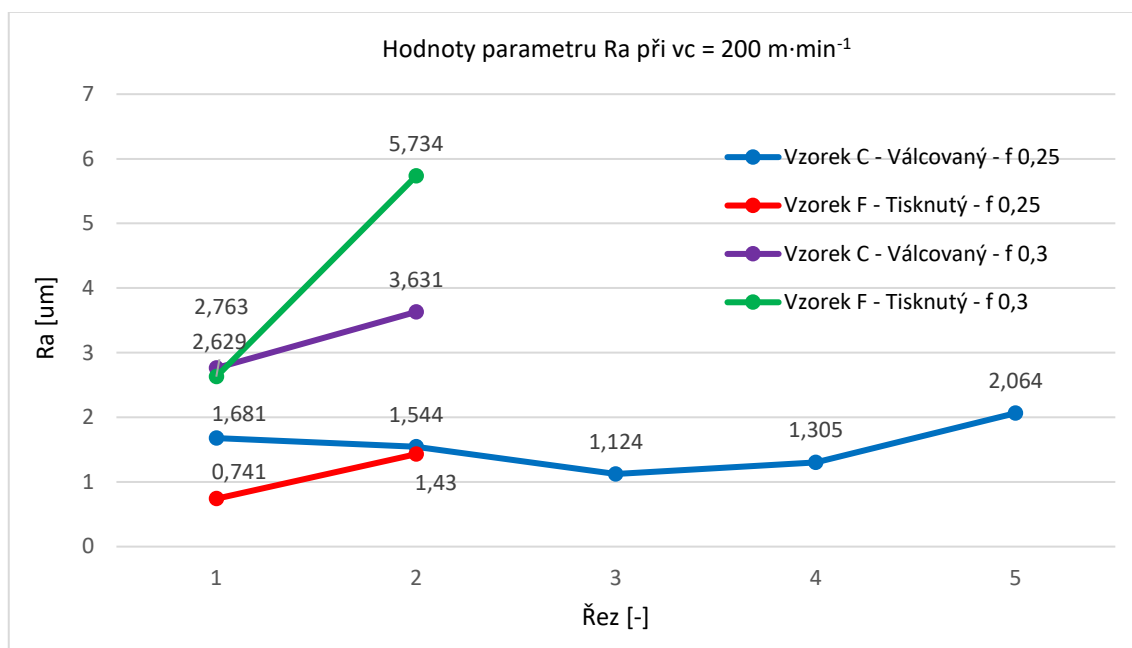


Graf 21 - Porovnání parametru drsnosti Ra po jednotlivých řezech při řezné rychlosti $185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

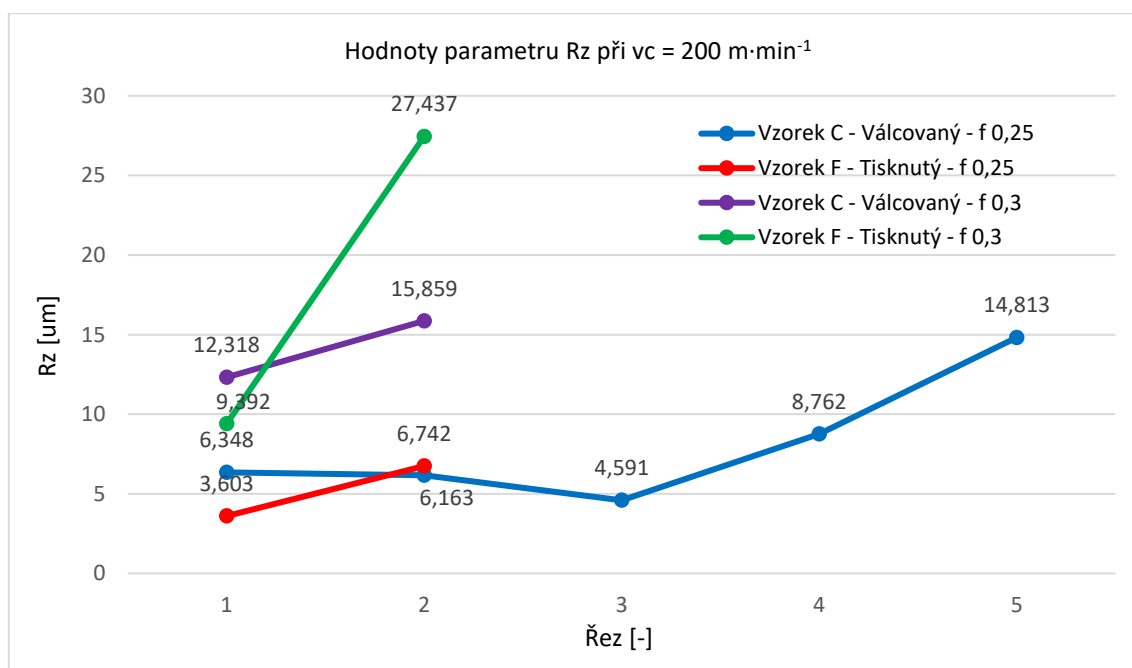


Graf 22 - Porovnání parametru drsnosti Rz po jednotlivých řezech při řezné rychlosti $185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

5.4.3 Porovnání parametru drsnosti Ra a Rz (vzorek C se vzorkem F)



Graf 23 - Porovnání parametru drsnosti Ra po jednotlivých řezech při řezné rychlosti $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$









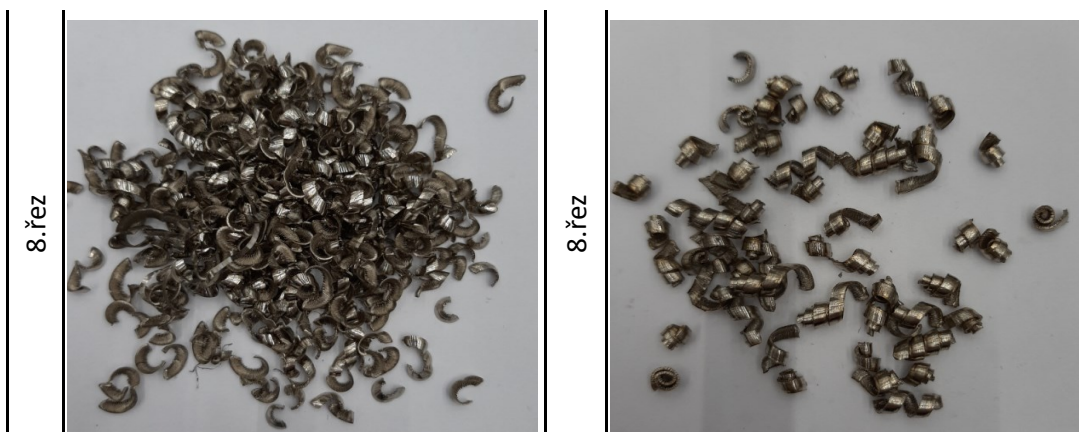
Graf 24 - Porovnání parametru drsnosti Rz po jednotlivých řezech při řezné rychlosti $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu $0,25 \text{ mm}$

5.5 Porovnání tvorby třísky

Porovnání tvorby třísky probíhalo vizuálně. Byly zaznamenány snímky třísek po jednotlivých řezech, přičemž do práce jsou přiloženy a porovnávány pouze snímky kde je znatelná změna tvaru třísky.

5.5.1 Porovnání tvorby třísky (vzorek A se vzorkem D)

Vzorek A – $vc = 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,25 \text{ mm}$		Vzorek D – $vc = 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,25 \text{ mm}$	
1.řez		1.řez	
8.řez		8.řez	
Vzorek A – $vc = 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,3 \text{ mm}$		Vzorek D – $vc = 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,3 \text{ mm}$	
1.řez		1.řez	











V případě obrábění tištěného vzorku D za posuvu 0,25 mm se tvořily převážně tvářené elementární třísky. Tvar třísky zůstal během všech řezů tištěným vzorkem za posuvu 0,25 mm stejný. Při změně posuvu na 0,3 mm se od prvního do čtvrtého řezu trend tvorby třísky nezměnil a vznikaly elementární třísky. Od pátého do osmého řezu obrábění došlo ke změně a tvořila se krátká šroubovitá a spirálová tříska.

Během obrábění válcovaného vzorku A za posuvu 0,25 mm se tvořily tvářené elementární a tvářené článkovité třísky. Od 4. řezu převažovala tvorba článkovitých třísek a tento trend se již dále neměnil. Zde se po zvýšení posuvu na 0,3 mm při prvním řezu tvořily převážně tvářené článkovité třísky, přičemž občas se vyskytla i tvářená plynulá tříska. Od druhého až do osmého řezu se tvořila převážně tvářená článkovitá a tvářená elementární tříska.

Při obrábění řeznou rychlostí $170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvem 0,25 mm vznikaly příznivější třísky při obrábění tištěného vzorku D, naopak při posuvu 0,3 mm vznikaly vhodnější třísky při obrábění válcovaného vzorku A.

5.5.2 Porovnání tvorby třísky (vzorek B se vzorkem E)





Vzorek B – $vc = 185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,25 \text{ mm}$		Vzorek E – $vc = 185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,25 \text{ mm}$	
1.řez		1.řez	
7.řez		8.řez	
Vzorek B – $vc = 185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,3 \text{ mm}$		Vzorek E – $vc = 185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,3 \text{ mm}$	
1.řez		1.řez	
5.řez		4. řez	





Při prvním řezu obrábění válcovaného vzorku B za posuvu 0,25 mm se tvořily různé třísky od tvářené článkovité, přes tvářenou plynulou až po dlouhou šroubovitou třísku. V dalších řezích se se zvětšujícím se opotřebením nástroje tvořily převážně krátké a dlouhé šroubovitě třísky, které jsou z hlediska odvodu z místa řezu, kvality obrobeného povrchu a bezpečnosti práce nevhodné. Při obrábění válcovaného vzorku B navíc došlo k vylomení břitu nástroje při 7. řezu. Po změně posuvu na 0,3 mm byly od prvního až do čtvrtého řezu tvořeny třísky převážně ve formě tvářených elementárních a tvářených článkovitých. Vlivem opotřebením nástroje, došlo u pátého řezu k tvorbě dlouhých šroubovitých třísek, což předcházelo vylomení břitu nástroje.

U prvního řezu obrábění tištěného vzorku E za posuvu 0,25 mm byly tvořeny spíše tvářené elementární třísky. Další řезы tištěným vzorkem byly doprovázeny tvorbou především tvářených elementárních třísek, ale v menším měřítku se objevovaly i třísky tvářené článkovité a tvářené plynulé. Se změnou posuvu na 0,3 mm vznikaly třísky během prvního řezu převážně tvářené elementární. U druhého řezu přecházely do tvářených článkovitých a při třetím řezu do krátkých šroubovitých třísek. Při čtvrtém řezu u obrábění tištěného vzorku E vznikaly dlouhé šroubovitě třísky a břit nástroje byl během tohoto řezu vylomen.

Při obrábění řeznou rychlostí $185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuvem 0,25 mm vznikaly vhodnější třísky při obrábění tištěného vzorku E. U posuvu 0,3 mm docházelo k tvorbě vhodnější třísky při obrábění válcovaného vzorku B.

5.5.3 Porovnání tvorby třísky (vzorek C se vzorkem F)

Vzorek C – $vc = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,25 \text{ mm}$		Vzorek F – $vc = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,25 \text{ mm}$	
1. řez		1. řez	
5. řez		2. řez	

Vzorek C – $vc = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,3 \text{ mm}$		Vzorek F – $vc = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,3 \text{ mm}$	
1.řez		1.řez	
2.řez		2.řez	

Při prvním řezu u obrábění válcovaného vzorku C za posuvu $0,25 \text{ mm}$ se jednalo především o tvorbu třísek tvářených plynulých a spirálových. Při dalších řezech se pak tvořily nejčastěji tvářené plynulé třísky. Během čtvrtého řezu, kdy už byl nástroj opotřeben se začaly tvořit třísky šroubovitě krátké a následně šroubovitě dlouhé. Během pátého řezu došlo vlivem značného opotřebení nástroje převážně k tvorbě dlouhých šroubovitých třísek a následnému vylomení břitu nástroje. Za posuvu $0,3 \text{ mm}$ vznikali během prvního řezu třísky tvářené článkovité. I při druhém řezu se tvořily převážně tvářené článkovité třísky. Během tohoto řezu se však nástroj značně opotřebil a ke konci začali vznikat tvářené plynulé třísky, a následně došlo k vylomení břitu nástroje.

Při obrábění tištěného vzorku F za posuvu $0,25 \text{ mm}$ se při prvním řezu tvořily třísky tvářené elementární a článkovité. Během druhého řezu vlivem opotřebení nástroje vznikaly krátké a dlouhé šroubovitě, ale také spirálové třísky. Již během druhého řezu se vylomil břit nástroje. Po změně posuvu na $0,3 \text{ mm}$ během prvního řezu převažovala tvorba třísek tvářených elementárních, ale objevovaly se i třísky tvářené článkovité a krátké šroubovitě. Od začátku druhého řezu vznikaly dlouhé šroubovitě třísky, načež po krátkém časovém úseku došlo k porušení břitu nástroje.

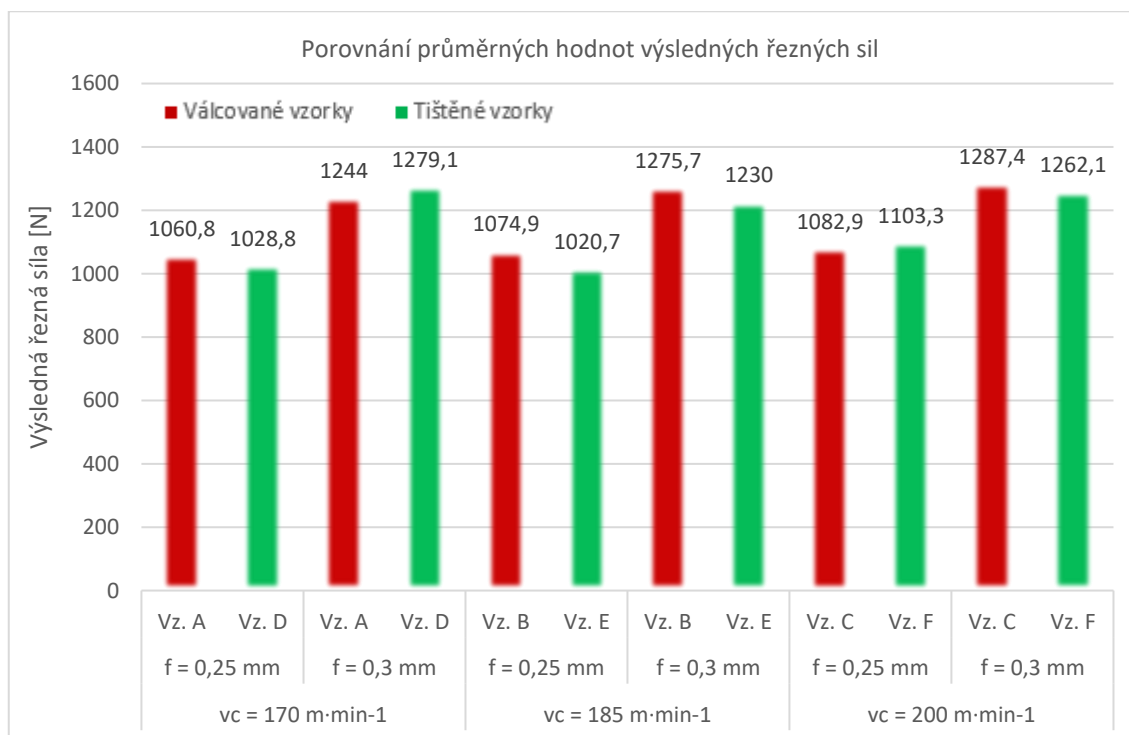
Při obrábění řeznou rychlostí $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuvem $0,25 \text{ mm}$ vznikaly vhodnější třísky při obrábění tištěného vzorku F, naopak u posuvu $0,3 \text{ mm}$ vznikala lepší třísky při obrábění válcovaného vzorku C.

5.6 Porovnání průměrných hodnot jednotlivých faktorů obrobitelnosti

Pro komplexní ale také přehlednější porovnání obrobitelnosti jsem zvolil porovnání pomocí sloupcových grafů. V každém z těchto grafů byly porovnávány průměrné hodnoty vypočítané z hodnot naměřených. Jednotlivým řezným parametrům náleží vždy dva porovnávané vzorky. Hodnoty posuvů, řezných rychlostí a označení vzorků jsou vždy naznačeny pod osou X.

5.6.1 Řezné síly

Pro jednotlivé řezné podmínky jsem zprůměroval hodnoty výsledných řezných sil. Graf byl rozdělen dle jednotlivých řezných parametrů, přičemž červenou barvou byly odlišeny válcované vzorky a zelenou barvou tištěné vzorky. Na ose Y je nanesena velikost výsledné řezné síly [N].



Graf 25 - Porovnání průměrných hodnot výsledných řezných sil

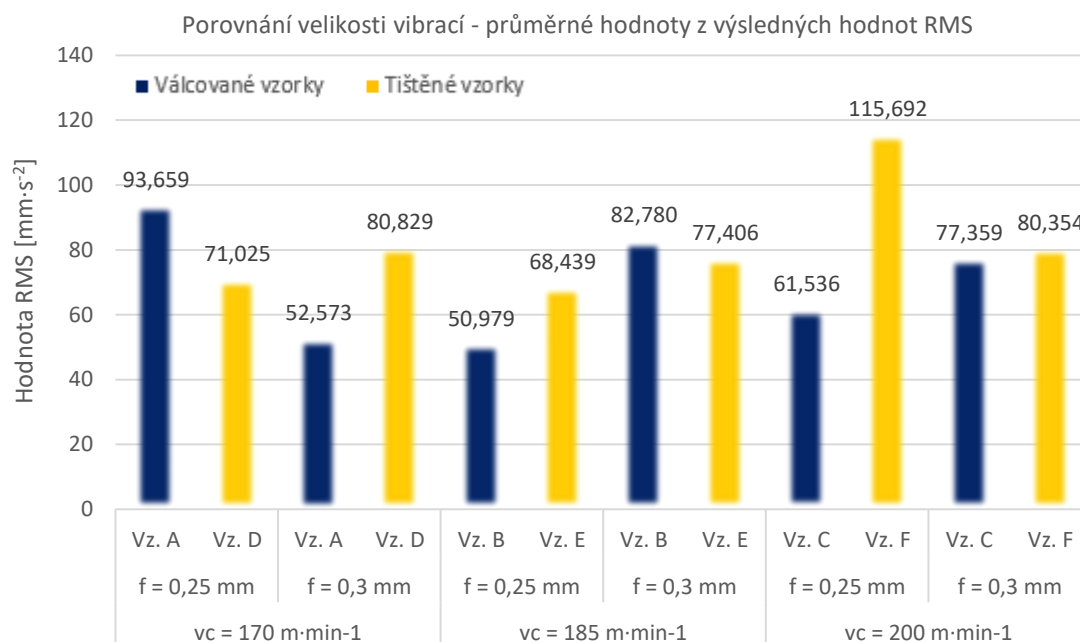
Při řezné rychlosti 170 m·min⁻¹ a posuvu 0,25 mm byla průměrná hodnota výsledné řezné síly nižší pro tištěný vzorek D. U posuvu 0,3 mm tomu bylo naopak. Nižší průměrné hodnoty výsledné řezné síly bylo dosaženo při obrábění válcovaného vzorku A.

Obrábění válcovaného vzorku B a tištěného vzorku E náležela řezná rychlost 185 m·min⁻¹. V tomto případě bylo dosaženo při obou hodnotách posuvů nižších průměrných hodnot výsledné řezné síly při obrábění tištěného vzorku.

U řezné rychlosti 200 m·min⁻¹ a posuvu 0,25 mm byla nižší průměrná hodnota výsledné řezné síly u obrábění válcovaného vzorku C. Zde je nutné podotknout, že při obrábění tištěného vzorku F proběhly pouze dva řezy a trvanlivost nástroje byla 122 s a při obrábění válcovaného vzorku proběhlo 5 řezů a trvanlivost nástroj činila 301 s.

5.6.2 Vibrace

Vypočítané výslednice zrychlení vibrací jsem pro jednotlivé řezné podmínky zprůměroval a pro lepší porovnání byl z těchto hodnot vytvořen sloupcový graf rozdělený dle jednotlivých řezných parametrů, kde byly modrou barvou odlišeny válcované vzorky a oranžovou barvou tištěné vzorky. Na osu Y byla nanesena hodnota RMS [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$].



Graf 26 - Porovnání průměrných hodnot výsledného zrychlení vibrací (RMS)

Při řezné rychlosti $170 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu $0,25 \text{ mm}$ byla průměrná hodnota výsledného zrychlení vibrací vyšší pro válcovaný vzorek A o necelých $16 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$. Při stejné řezné rychlosti u posuvu $0,3 \text{ mm}$ byla naopak průměrná hodnota výsledného zrychlení vibrací vyšší pro tištěný vzorek D o více než $28 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$.

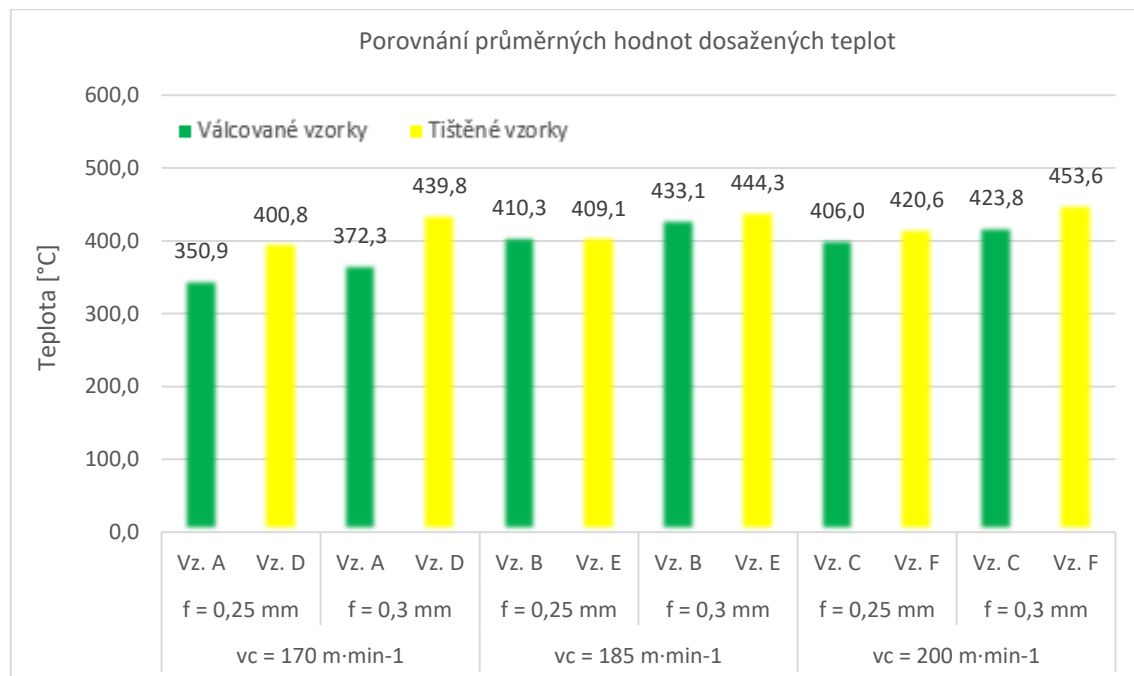
U řezné rychlosti $185 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ tomu bylo naopak než u předchozích řezných podmínek. Pro posuv $0,25 \text{ mm}$ byla průměrná hodnota výsledného zrychlení vibrací vyšší pro tištěný vzorek E, a to o přibližně $17 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$. U posuvu $0,3 \text{ mm}$ byla průměrná hodnota výsledného zrychlení vibrací vyšší pro válcovaný vzorek B o více než $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$.

U řezné rychlosti $200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ již byly průměrné hodnoty výsledných velikostí vibrací u obou posuvů vyšší pro tištěný vzorek F.

Nejnižší hodnoty zrychlení vibrací RMS byly dosaženy při obrábění válcovaného vzorku B při řezné rychlosti $185 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu $0,25 \text{ mm}$. Druhé srovnatelné hodnoty RMS byly zjištěny při obrábění válcovaného vzorku A, při řezné rychlosti $170 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu $0,3 \text{ mm}$. Razantně nejvyšší hodnoty RMS byly naměřeny při obrábění tištěného vzorku F řeznou rychlostí $200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a posuvu $0,25 \text{ mm}$. Pouze při dvou řezných podmínkách byly nižší hodnoty RMS naměřeny během obrábění tištěného vzorku.

5.6.3 Teploty v místě styku nástroje s obrobkem

Pro jednotlivé řezné podmínky jsem teploty zprůměroval a z těchto hodnot jsem vytvořil sloupcový graf rozdělený podle jednotlivých řezných parametrů kde jsem na osu Y nanesl teplotu [°C].

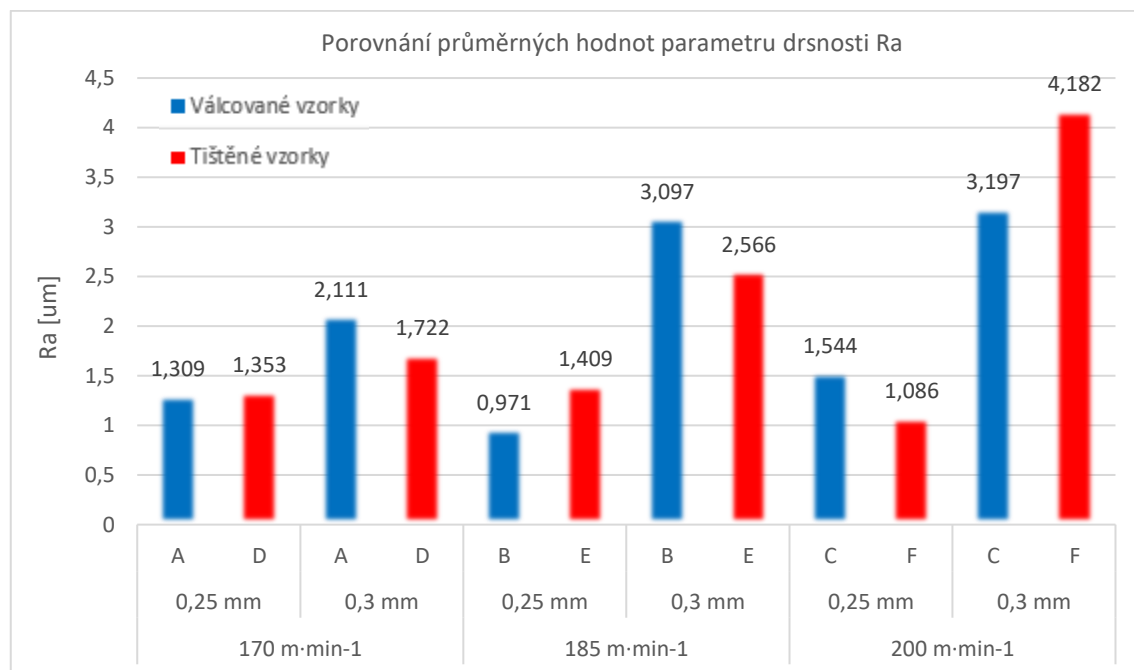


Graf 27 - Porovnání průměrných teplot

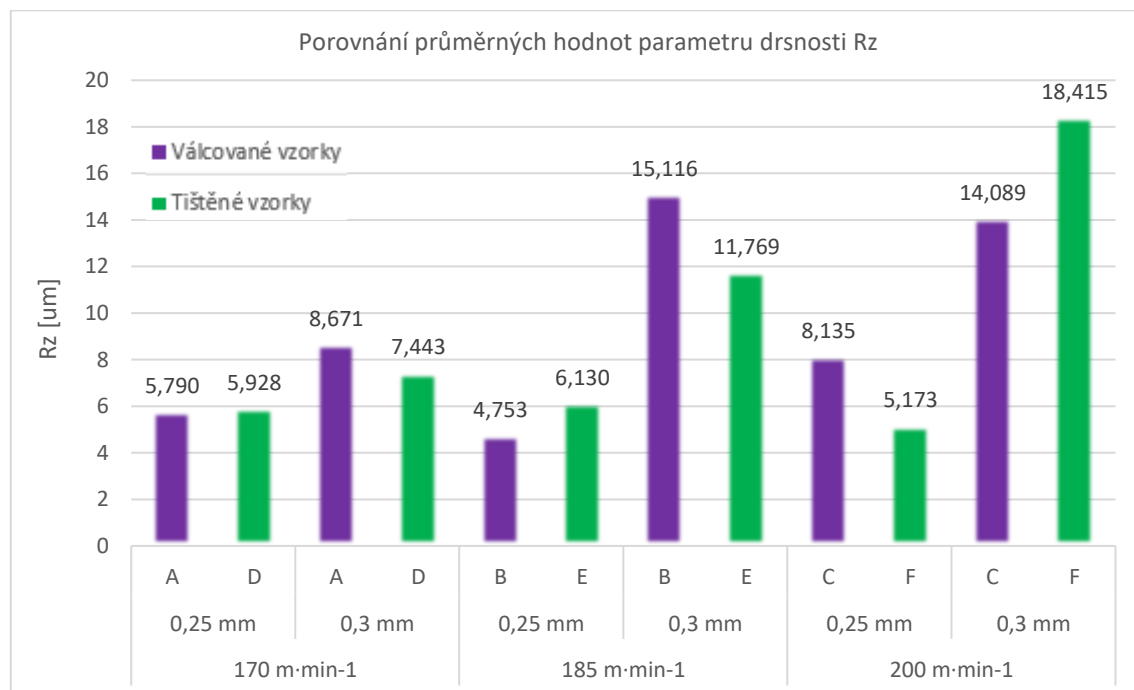
Při všech řezných podmínkách kromě řezné rychlosti 185 m·min⁻¹ za posuvu 0,25 mm byly průměrné hodnoty teplot v místě styku nástroje s obrobkem nižší při obrábění válcovaného vzorku. Zároveň při rychlosti 185 m·min⁻¹ byly při obou posuvech rozdíly teplot mezi jednotlivými vzorky nejmenší. Při posuvu 0,25 mm byl rozdíl minimální a to přibližně 1°C, u posuvu 0,3 mm byl rozdíl průměrných hodnot teplot přibližně 11°C. U řezné rychlosti 170 m·min⁻¹, konkrétně u posuvu 0,3 mm byl rozdíl průměrné teploty nejmarkantnější.

5.6.4 Parametry drsnosti

Pro jednotlivé parametry drsnosti (R_a a R_z) byly vytvořeny sloupkové grafy, které přehledně porovnávají průměrné hodnoty parametrů drsnosti. Modrou barvou jsou značeny hodnoty parametrů drsnosti R_a pro válcované vzorky a červenou barvou hodnoty parametrů drsnosti R_a pro vzorky tištěné. Pro parametry drsnosti R_z jsou poté značeny vzorky tištěné zelenou barvou a vzorky válcované fialovou barvou. Na osu Y byl nanesen parametr drsnosti.



Graf 28 - Porovnání průměrných hodnot parametru drsnosti R_a



Graf 29 - Porovnání průměrných hodnot parametru drsnosti R_z

Na grafu 27 je zobrazeno porovnání průměrných hodnot parametru drsnosti Ra, zatímco na grafu 28 je porovnání průměrných hodnot parametru drsnosti Rz.

Při řezné rychlosti $170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu $0,25 \text{ mm}$ byla průměrná hodnota parametru drsnosti Ra vyšší pro tištěný vzorek, a stejně tomu bylo i u parametru Rz. Lepších hodnot drsnosti tak dosáhnul válcovaný vzorek A. U posuvu $0,3 \text{ mm}$ bylo pro oba parametry – Ra i Rz zjištěno že vyšších průměrných hodnot parametrů drsnosti dosahoval válcovaný vzorek A, proto lepší jakosti povrchu dosáhl tištěný vzorek D.

Grafy znázorňují, že při řezné rychlosti $185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu $0,25 \text{ mm}$ byla průměrná hodnota parametrů drsnosti Ra i Rz vyšší pro tištěný vzorek E. Zde bylo dosaženo jednoznačně lepší jakosti povrchu po obrábění válcovaného vzorku B. Při posuvu $0,3 \text{ mm}$ tomu bylo stejně jako u posuvu $0,25$ u průměrné hodnoty parametru drsnosti Ra, avšak průměrná hodnota parametru drsnosti Rz byla vyšší po obrábění válcovaného vzorku.

Řezná rychlost $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ v kombinaci s posuvem $0,25 \text{ mm}$ ukazuje, že u hodnot parametrů drsnosti Ra i Rz bylo nižší hodnoty dosaženo u tištěného vzorku. Zároveň je potřeba znovu podotknout, že při obrábění tištěného vzorku dosáhla trvanlivost nástroje pouhých 122s, přičemž při obrábění válcovaného vzorku dosáhl nástroj trvanlivosti 301 s, takže nižší průměrné hodnoty parametrů jsou v tomto případě zavádějící. Po obrábění posuvem $0,3 \text{ mm}$ vykazovaly nižší průměrné hodnoty parametrů drsnosti Ra i Rz při obrábění válcovaného vzorku. Trvanlivost zde dosáhla při obrábění válcovaného vzorku 83 s a při obrábění tištěného vzorku 60s. Nižší parametry drsnosti u tohoto posuvu s kombinací s vyšší trvanlivostí nástroje tak ukazují na lepší jakost obrobku po obrábění válcovaného vzorku.

5.6.5 Komplexní zhodnocení obrobitelnosti

Z předešlých grafů a snímků je možné komplexně zhodnotit obrobitelnost pomocí porovnání všech aspektů pro jednotlivé řezné podmínky. Kvalitním hodnotitelem obrobitelnosti je trvanlivost nástroje, jelikož trvanlivost nástroje poukazuje na souhrnný vliv všech aspektů obrobitelnosti.

- Řezná rychlost $170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuv $0,25 \text{ mm}$.

Nižší hodnoty řezných sil a vibrací zde náleželi tištěnému vzorku D. Naopak tomu bylo u porovnání teplot, kde bylo nižších hodnot dosaženo při obrábění válcovaného vzorku A. Tyto aspekty spolu úzce souvisí, protože pokud dosahujeme vyšších teplot při obrábění, řezné síly a vibrace se zmenšují, jelikož je dosaženo většího ovlivnění mechanických vlastností obrobku, ale i nástroje (obráběný materiál je měkký a tudíž lépe obrobitelný, ale zároveň i nástroj je tepelně ovlivněný a může docházet k rychlejšímu opotřebení). Průměrná hodnota parametrů drsnosti Ra i Rz vykazovala nepatrně nižší hodnoty při obrábění válcovaného vzorku A. Na nástroji pro obrábění válcovaného vzorku nebylo znatelné žádné větší opotřebení, u nástroje po obrábění tištěného vzorku byly pozorovatelné vyhřáté zóny na nástroji a lehký vrub na břitu nástroje. Oba nástroje přitom zvládli předem určených 8 řezů. Tvar třísky byl při obrábění válcovaného vzorku A elementární až článkovitý a při obrábění tištěného vzorku D se tvořila převážně elementární tříska, takže vhodnější tříska z hlediska tvaru a objemu se tvořila při obrábění tištěného vzorku D. Zde byl lépe obrobitelný tištěný vzorek A, což demonstrují velikosti teplot, hodnoty parametrů drsnosti a menší opotřebení břitu nástroje.

Tabulka 19 - Komplexní zhodnocení obrobiteľnosti pro řeznou rychlost 170 m·min⁻¹ a posuv 0,25 mm

Řezná rychlost $vc = 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$		
Posuv $f = 0,25 \text{ mm}$		
	Válcovaný vzorek A	Tištěný vzorek D
Řezné síly [N]	1060,8	1028,8
Vibrace [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$]	93,659	71,025
Teploty [$^{\circ}\text{C}$]	350,9	400,8
Parametry drsnosti Ra [μm]	1,309	1,353
Parametry drsnosti Rz [μm]	5,79	5,928
Opotřeben	Menší	Větší
Tvorba třísky	Horší	Lepší
Trvanlivost nástroje [s]	>549	>549
Celková obrobiteľnost	Lepší	Horší

- Řezná rychlost 170 m·min⁻¹ a posuv 0,3 mm.

Zde bylo nižších hodnot řezných sil, vibrací i teplot dosaženo při obrábění válcovaného vzorku A. To mohlo být zapříčiněno mikrostrukturou či zpevněním povrchové vrstvy u tištěného vzorku D po předchozích řezech, kde bylo také dosahováno vyšších teplot při obrábění. Hodnoty parametrů drsnosti Ra i Rz byly naopak znatelně nižší pro tištěný vzorek D. Při obrábění tištěného vzorku došlo během posledního řezu k vyštípnutí špičky nástroje. Proto vyšší trvanlivosti dosáhl nástroj při obrábění válcovaného vzorku, na kterém ani po 8. řezu nebylo žádné významné opotřeben. Při obrábění válcovaného vzorku A se tvořila převážně elementární a článkovitá třísky. Při obrábění tištěného vzorku se při prvních řezech tvořila tvářená elementární třísky a postupně třísky článkovité až spirálové či krátká šroubovitá. To bylo způsobeno opotřebením nástroje. Vhodnější třísky při těchto řezných podmínkách z hlediska tvaru a objemu vznikala při obrábění válcovaného vzorku A. Za těchto řezných podmínek tedy můžeme hovořit o lepší obrobiteľnosti válcovaného vzorku A z hlediska nižších hodnot řezných sil, vibrací i teplot, vhodnější tvorby třísky a delší trvanlivosti nástroje.

Tabulka 20 - Komplexní zhodnocení obrobiteľnosti pro řeznou rychlost 170 m·min⁻¹ a posuv 0,3 mm

Řezná rychlost $vc = 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$		
Posuv $f = 0,3 \text{ mm}$		
	Válcovaný vzorek A	Tištěný vzorek D
Řezné síly [N]	1244	1279,1
Vibrace [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$]	52,573	80,829
Teploty [$^{\circ}\text{C}$]	372,3	439,8
Parametry drsnosti Ra [μm]	2,111	1,722
Parametry drsnosti Rz [μm]	8,671	7,443
Opotřeben	Menší	Větší
Tvorba třísky	Lepší	Horší
Trvanlivost nástroje [s]	>271	271
Celková obrobiteľnost	Lepší	Horší

- Řezná rychlost $185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuv $0,25 \text{ mm}$.

Průměrná řezná síla byla nižší u tištěného vzorku E, ale vibrace byly pro tištěný vzorek vyšší. Průměrná teplota při obrábění dosáhla přibližně stejných hodnot (při obrábění tištěného vzorku byla nižší o 1°C). Obě průměrné hodnoty parametrů drsnosti R_a i R_z byly nižší po obrábění válcované oceli. U obrábění válcovaného vzorku B však došlo k vylomení břitu nástroje již po 7. řezu, a tak vyšší trvanlivosti dosáhl nástroj při obrábění tištěného vzorku E, který uskutečnil i 8. řez bez porušení břitu nástroje. Na tomto nástroji byly opět pozorovatelné pouze vyhráté zóny. Při obrábění válcovaného vzorku vznikl šroubovitý tvar třísek a ze začátku se jednalo spíše o třísky tvářené článkovité, plynulé a krátké šroubovitě ale během dalších řezů vznikali už převážně krátké a dlouhé šroubovitě třísky. Během obrábění tištěné oceli vznikali po celou dobu tvářené elementární a článkovité třísky. Při těchto řezných podmínkách můžeme s odkazem na delší trvanlivost nástroje, vhodnější tvorbu třísek a nižší řezné síly hovořit o lepší obrobiteľnosti tištěného vzorku E.

Tabulka 21 -Komplxní zhodnocení obrobiteľnosti pro řeznou rychlost $185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuv $0,25 \text{ mm}$

Řezná rychlost $vc = 185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$		
Posuv $f = 0,25 \text{ mm}$		
	Válcovaný vzorek B	Tištěný vzorek E
Řezné síly [N]	1074,9	1020,7
Vibrace [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$]	50,979	68,439
Teploty [$^\circ\text{C}$]	410,3	409,1
Parametry drsnosti R_a [μm]	0,971	1,409
Parametry drsnosti R_z [μm]	4,753	6,13
Opotřebení	Větší	Menší
Tvorba třísky	Horší	Lepší
Trvanlivost nástroje [s]	450	>500
Celková obrobiteľnost	Horší	Lepší

- Řezná rychlost $185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuv $0,3 \text{ mm}$.

Zde bylo dosaženo nižších průměrných hodnot řezných sil i vibrací při obrábění tištěného vzorku E. Nižší průměrná hodnota teploty byla naměřena při obrábění válcovaného vzorku B. Lepší, tedy nižší průměrná hodnota parametru drsnosti R_a byla zjištěna u válcovaného vzorku, zatímco nižší průměrná hodnota parametru drsnosti R_z byla naopak zjištěna u vzorku tištěného. Nástroj při obrábění tištěného vzorku E vydržel bez porušení do 4. řezu, během kterého však došlo k vylomení břitu. Nástroj při obrábění válcovaného vzorku B měl vyšší trvanlivost a břit nástroje byl vylomen během 5. řezu. Třísky při obrábění válcovaného vzorku B byly převážně ve formě tvářených elementárních a tvářených článkovitých, přičemž s opotřebením nástroje při pátém řezu nastala tvorba dlouhých šroubovitých třísek. Obrábění tištěného vzorku E bylo doprovázeno tvorbou všech tvarů třísek – elementární, článkovité, plynulé a krátké šroubovitě, přičemž s větším opotřebením při posledním (čtvrtém řezu) se tvořili dlouhé šroubovitě třísky. Lepší obrobiteľnost válcovaného vzorku B je v tomto případě doložena hlavně vyšší trvanlivostí nástroje, nižší průměrnou hodnotou teploty při obrábění a vhodnějším tvarem třísek v průběhu všech řezů.

Tabulka 22 - Komplexní zhodnocení obrobiteľnosti pro řeznou rychlost 185 m·min⁻¹ a posuv 0,3 mm

Řezná rychlost $vc = 185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$		
Posuv $f = 0,3 \text{ mm}$		
	Válcovaný vzorek B	Tištěný vzorek E
Řezné síly [N]	1275,7	1230
Vibrace [mm·s ⁻²]	82,78	77,406
Teploty [°C]	433,1	444,3
Parametry drsnosti Ra [μm]	3,097	2,566
Parametry drsnosti Rz [μm]	15,116	11,769
Opotřebení	Menší	Větší
Tvorba třísky	Lepší	Horší
Trvanlivost nástroje [s]	162	122
Celková obrobiteľnost	Lepší	Horší

- Řezná rychlost 200 m·min⁻¹ a posuv 0,25 mm.

Nižší průměrné hodnoty řezných sil, zrychlení vibrací i teplot zde byly zjištěny při obrábění válcovaného vzorku C. Lepší hodnoty parametru Ra i Rz vykazoval tištěný vzorek F. Při obrábění tištěného vzorku byly provedeny pouze 2. řezy, přičemž během druhého došlo k vylomení břitu nástroje a zkoumání tak bylo ukončeno. Obrábění válcovaného vzorku bylo za těchto řezných podmínek delší, a to s počtem 5. řezů, a zde také při posledním řezu došlo k vylomení břitu nástroje. Při obrábění válcovaného vzorku zprvu vznikaly třísky tvážené plynulé až spirálové, při pátém (posledním) řezu pak dlouhé šroubovitě. Při obrábění tištěného vzorku zpočátku vznikaly třísky tvážené elementární a článkovité, a během druhého (posledního) řezu už spirálové, krátké šroubovitě a dlouhé šroubovitě. Za těchto řezných podmínek můžeme jednoznačně mluvit o lepší obrobiteľnosti válcovaného vzorku C.

Tabulka 23 - Komplexní zhodnocení obrobiteľnosti pro řeznou rychlost 200 m·min⁻¹ a posuv 0,25 mm

Řezná rychlost $vc = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$		
Posuv $f = 0,25 \text{ mm}$		
	Válcovaný vzorek C	Tištěný vzorek F
Řezné síly [N]	1082,9	1103,3
Vibrace [mm·s ⁻²]	61,536	115,692
Teploty [°C]	406	420,6
Parametry drsnosti Ra [μm]	1,544	1,086
Parametry drsnosti Rz [μm]	8,135	5,173
Opotřebení	Menší	Větší
Tvorba třísky	Horší	Lepší
Trvanlivost nástroje [s]	301	122
Celková obrobiteľnost	Lepší	Horší

- Řezná rychlost 200 m·min⁻¹ a posuv 0,3 mm.

Nižších průměrných hodnot řezných sil bylo dosaženo při obrábění tištěného vzorku F, a naopak nižší hodnoty zrychlení vibrací a teplot vznikaly při obrábění válcovaného vzorku C. U parametrů drsnosti povrchu Ra i Rz byly vykazovány nižší hodnoty rovněž po obrábění válcovaného vzorku

C. U obou vzorků byly provedeny pouze 2. řezy a v obou případech nastalo porušení břitu nástroje při tomto, druhém řezu. Vyšší trvanlivost měla destička při obrábění válcovaného vzorku, a to konkrétně 83s, oproti 60s trvanlivosti nástroje při obrábění tištěného vzorku F. Lepší tvorbu třísky při těchto řezných podmínkách jsem zaznamenal pro válcovaný vzorek C, jelikož vznikaly převážně tvářené článkovité třísky. Při obrábění tištěného vzorku zprvu vznikaly tvářené článkovité třísky, ale postupně se tvořili krátké šroubovitě, a nakonec dlouhé šroubovitě třísky. Lepší obrobiteľnosť zde náleží výslovně válcovanému vzorku C, který dosáhl nižších hodnot řezných sil, vibrací, teplot, parametrů drsnosti, a dokonce i delší trvanlivosti, včetně lepší tvorby třísky.

Tabulka 24 - Komplexní zhodnocení obrobiteľnosti pro řeznou rychlost $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuv $0,3 \text{ mm}$

Řezná rychlost $vc = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$		
Posuv $f = 0,3 \text{ mm}$		
	Válcovaný vzorek C	Tištěný vzorek F
Řezné síly [N]	1287,4	1262,1
Vibrace [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$]	77,359	80,354
Teploty [$^{\circ}\text{C}$]	423,8	453,6
Parametry drsnosti Ra [μm]	3,197	4,182
Parametry drsnosti Rz [μm]	14,089	18,415
Opotřebení	Menší	Větší
Tvorba třísky	Lepší	Horší
Trvanlivost nástroje [s]	83	60
Celková obrobiteľnosť	Lepší	Horší

6 ZÁVĚR, ZHODNOCENÍ

Tato diplomová práce se zabývala porovnáním obrobitelnosti korozivzdorné oceli DIN 1.4404 vyrobené dvěma technologiemi, kterými byly technologie válcování a technologie aditivní výroby materiálu (technikou SLM). Z hlediska obrobitelnosti bylo řešeno hned šest faktorů, kterými byly:

- řezné síly,
- vibrace,
- teploty v místě styku nástroje s obrobkem,
- parametry drsnosti povrchu (R_a a R_z),
- opotřebení nástroje,
- tvorba třísky.

Nejnižších hodnot řezných sil bylo dosaženo při obrábění tištěného vzorku řeznou rychlostí $185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvem $0,25 \text{ mm}$, přičemž velmi podobných hodnot bylo dosaženo při obrábění tištěného vzorku řeznou rychlostí $170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuvem $0,25 \text{ mm}$. Nejvyšší hodnoty řezných sil byly naměřeny při obrábění válcovaného vzorku řeznou rychlostí $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuvem $0,3 \text{ mm}$. Při porovnání u jednotlivých řezných parametrů byly nižší hodnoty výsledných řezných sil zaznamenány při obrábění válcovaného vzorku pouze ve dvou případech ($v_c = 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,3 \text{ mm}$; $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,25 \text{ mm}$), u zbytku byly nižší řezné síly dosaženy při obrábění tištěných vzorků. Zároveň zde bylo potvrzeno teoretické tvrzení, že zvýšením posuvu lze dosáhnout markantnějších rozdílů ve velikostech řezných sil než zvýšením řezné rychlosti.

Nejnižší hodnoty zrychlení vibrací RMS byly dosaženy při obrábění válcovaného vzorku řeznou rychlostí $185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvem $0,25 \text{ mm}$. Srovnatelné hodnoty RMS byly zjištěny při obrábění válcovaného vzorku řeznou rychlostí $170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvem $0,3 \text{ mm}$. Razantně nejvyšší hodnoty RMS byly naměřeny při obrábění tištěného vzorku F řeznou rychlostí $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvu $0,25 \text{ mm}$. Pouze při dvou řezných podmínkách byly nižší průměrné hodnoty RMS zjištěny během obrábění tištěných vzorků ($v_c = 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,25 \text{ mm}$; $v_c = 185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,3 \text{ mm}$), u zbytku byly příznivější hodnoty zaznamenány při obrábění válcovaných vzorků.

Optimálních teplot bylo dosaženo při obrábění válcovaného vzorku řeznou rychlostí $170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvem $0,25 \text{ mm}$ i $0,3 \text{ mm}$, přičemž nejnižší hodnota náležela obrábění při posuvu $0,25 \text{ mm}$. Nejhorší hodnoty byly naměřeny při obrábění tištěného vzorku řeznou rychlostí $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvem $0,3 \text{ mm}$ a tištěného vzorku řeznou rychlostí $185 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvem $0,3 \text{ mm}$. Pouze jedna řezná podmínka vykazovala srovnatelné hodnoty teplot, jinak během obrábění všech vzorků byly hodnoty teplot vhodnější (nižší) při obrábění válcovaných vzorků.

Nejnižších parametrů drsnosti povrchu R_a i R_z bylo dosaženo po obrábění válcovaného vzorku při $v_c 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $f 0,25 \text{ mm}$. Druhých nejnižších hodnot parametru drsnosti R_a bylo dosaženo při obrábění tištěného vzorku při $v_c 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $f 0,25 \text{ mm}$, ale toto porovnání není příliš kompetentní, jelikož při těchto řezných parametrech byly provedeny pouze dva řezy, než došlo k porušení břitu nástroje. Kvalitních výsledků bylo dosaženo při obrábění řeznou rychlostí $170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvem $0,25 \text{ mm}$, kde byly výsledky srovnatelné pro oba vzorky a dosahovaly nejnižších hodnot. Absolutně nejhorší (nevyšší) hodnoty parametrů drsnosti povrchu R_a i R_z byly

naměřeny při obrábění tištěného vzorku při v_c 200 m·min⁻¹ a f 0,3 mm a druhých nejhorších hodnot bylo dosaženo při stejných řezných podmínkách po obrábění válcovaného vzorku. Celkově markantně vyšších hodnot parametrů drsnosti povrchu bylo dosaženo po obrábění za posuvu 0,3 mm.

Nejmenší opotřebení nástroje vznikalo při obrábění tištěného i válcovaného vzorku řeznou rychlostí 170 m·min⁻¹ a posuvem 0,25 mm i 0,3 mm. Dále také při obrábění tištěného vzorku řeznou rychlostí 185 m·min⁻¹ a posuvem 0,25 mm. Během předem určených osmi řezů u obrábění těchto vzorků nebylo dosaženo porušení břitu nástroje. Nejkratší trvanlivosti nástroje (60 s), tedy k nejdřívějšímu opotřebení došlo během druhého řezu obrábění tištěného vzorku řeznou rychlostí 200 m·min⁻¹ a posuvem 0,3 mm. Druhou nejhorší trvanlivost měl nástroj při obrábění válcovaného vzorku taktéž řeznou rychlostí 200 m·min⁻¹ a posuvem 0,3 mm.

Nejvhodnější tříška z hlediska tvaru a objemu vznikala při obrábění tištěného vzorku řeznou rychlostí 170 m·min⁻¹ za posuvu 0,25 mm. Vhodný tvar třísky vznikl také při obrábění válcovaného vzorku řeznou rychlostí 170 m·min⁻¹ za posuvu 0,25 mm a tištěného vzorku při řezné rychlosti 185 m·min⁻¹ a posuvu 0,25 mm. Nevhodný tvar třísky vznikl při obrábění válcovaných vzorků řeznou rychlostí 185 m·min⁻¹ za posuvu 0,25 mm a při obrábění tištěných vzorků řeznou rychlostí 200 m·min⁻¹, posuvem 0,25 mm. Dlouhé šroubovitě třísky, které jsou při obrábění nevhodné, vznikaly zejména při posledním řezu obrábění válcované i tištěné oceli řeznou rychlostí 185 m·min⁻¹ za posuvu 0,3 mm. Takové třísky vznikaly i při posledním řezu obrábění tištěného vzorku řeznou rychlostí 200 m·min⁻¹ posuvem 0,3 mm.

Optimální podmínky pro obrábění tištěné oceli DIN 1.4404 bez chlazení jsou $v_c = 185$ m·min⁻¹, $f = 0,25$, $a_p = 2$ mm. Pro obrábění válcované oceli DIN 1.4404 bez chlazení jsou optimální řezné podmínky $v_c = 170$ m·min⁻¹, $f = 0,25$ mm, $a_p = 2$ mm.

7 SEZNAM LITERATURY

- [1] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Marek SADÍLEK, Lenka PETŘKOVSKÁ a Jana NOVÁKOVÁ. *NOVÉ SMĚRY V PROGRESIVNÍM OBRÁBĚNÍ* [online]. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2007 [cit. 2021-03-10]. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>
- [2] Příručka pro technology: Jak je to s řeznými silami? *MM Průmyslové spektrum* [online]. Brno, 2012, (120314), 1 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami>
- [3] Obrábění a zpracování kovů: Silové poměry při procesu řezání, řezná síla a její složky. *ELUC* [online]. 2015, (1196), 1 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1196>
- [4] *Rady pro výběr materiálu* [online]. Tišnov: Nerezmaterial, 2021 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://www.nerezmaterial.cz/rady>
- [5] NETOLICKÁ, Eliška. *Parametry řezného procesu* [online]. Praha, 2016 [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66480/F2-BP-2016-Netolicka-Eliska-Experimentalni%20mereni%20parametru%20rezného%20procesu.pdf?sequence=-1>. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Vítězslav Rázek.
- [6] *Renishaw plc.* [online]. Brno: Renishaw, c2001-2021 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/renishaw-zvy%c5%a1ov%c3%a1n%c3%ad-efektivitu-ve-v%c3%bdrob%c4%9b-a-zdravotn%c3%ad-p%c3%a9%c4%8di--1030>
- [7] HAJNÝŠ, Jiří. *Výzkum vlivu dokončovacích operací na modifikaci užitečných vlastností součástí vyrobených aditivní technologií*. Ostrava, 2019. Disertační práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Jana Petrů.
- [8] ASTM F2924-14. Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion. 2014.
- [9] VAN ELSSEN, M. Complexity of Selective Laser Melting: a new optimisation approach. 2007.
- [10] FRANCHITTI, S., a další. Investigation on Electron Beam Melting: Dimensional accuracy and process repeatability. *Vacuum*. 2018, Sv. 157, pp. 340-348.
- [11] EANE, R. B. Metal Powder Effects on Selective Laser Sintering. PhD thesis. University of Leeds, 2002, pp. 236.
- [12] SIMONELLI, M., TUCK, C., ABOULKHAIR, N. T., MASKERY, I., ASHCROFT, I., WILDMAN, R. D., HAGUE, A. R. A Study on the Laser Spatter and the Oxidation Reactions During Selective Laser Melting of 316L Stainless Steel, Al-Si10-Mg, and Ti-6Al-4V. In: *Metallurgical and Materials Transactions A* (2015). doi: 10.1007/s11661-015-2882-8.
- [13] TOLOCHKO, N. K., KHLOPKOV, Y. V., MOZZHAROV, S. E., IGNATIEV, M. B., LAOUI, T. a TITOV, V. I. Absorptance of powder materials suitable for laser sintering". In: *Rapid Prototyping Journal* 6.3 (2000), pp. 155. doi: 10.1108/13552540010337029.
- [14] YADROITSEV, I. Selective laser melting: Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal, 2009

- [15] KEMPEN, K., Expanding the materials palette for Selective Laser Melting of metals. PhD thesis. KU Leuven, 2015.
- [16] IBRAHIM K. A., WU B., BRANDON N. P. Electrical Conductivity and Porosity in Stainless Steel 316L Scaffolds for Electrochemical Devices Fabricated Using Selective Laser Sintering. *Materials & Design*, 2016, vol. 106, pp. 51-59
- [17] CARTER J.K. Additive Manufacturing of Bioinspired Bulk Gradient Structures to Enhance Mechanical Performance. Undergraduate Research Scholars Program. Texas: Texas A&M University, Department of Engineering Technology & Industrial Distribution, 2018
- [18] RENISHAW, Magics training: Material profile editing. RENISHAW: apply innovation. United Kingdom: Renishaw, 2016. Available from: <https://www.renishaw.com>
- [19] KRUTH, J.-P. Niet-conventionele bewerkingsmethoden: deel 1. Acco, Belgium, 2013. ISBN 9789033452635.
- [20] HUMÁR, Anton. TECHNOLOGIE I. *TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. Brno: Humár, 2003, s. 138 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabení/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf
- [21] PROCHÁZKA, Luděk. *VIBRACE PŘI SOUSTRUŽENÍ* [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=104129 .
Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Zdeněk Fiala.
- [22] FOJTŮ, Petr. Problematika samobuzeného kmitání při obrábění [online]. 2009: 15 s [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/history/2009/sbornik/Papers/pdf/FojtuPetr-304483.pdf>
- [23] ZELINSKI, Peter. Maximum Aluminium [online]. 2001 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <http://www.mmsonline.com/articles/maximum-aluminum>
- [24] ŘASA, Jaroslav. Úvahy o stanovení obrobiteľnosti materiálu - I. část. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2016 (160541), 1 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/uvahy-o-stanoveni-obrobiteľnosti-materialu-i-cast>
- [25] KOCMAN, K. - PROKOP, J.: Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM Brno, 2001. ISBN 80-214-1996-2
- [26] VASILKO, K. - HRUBÝ, J. - LIPTÁK, J.: Technológia obrábania a montáže. Bratislava: Alfa Bratislava, 1991 496 s. ISBN 80-05-00807-4.
- [27] SANDVIK Coromant: Příručka obrábění. Praha: Scientia s.r.o. Praha, 1997, 910 s. ISBN 91-97 22 99-4-6
- [28] BENDA, Alexandr. *Mikrostrukturní a únavové charakteristiky oceli AISI 316L připravené 3D tiskem* [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: https://3dprint-research.com/wp-content/uploads/2019/07/Mikrostrukturni_a_unavove_charakteristiky_oceli_AISI_316L_prip_ravene_3D_tiskem-2.pdf Diplomová práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Martin Kraus.

- [29] *Metrologická confirmace měřidla* [online]. Brno, 2011 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41432
Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Petr Koška.
- [30] *Kontrola drsnosti povrchu. Elektronická učebnice* [online]. 2015, (1102) [cit. 2021-5-11].
Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1102>
- [31] SMRČKOVÁ, Olga. *Sledování vlivu utvařeče třísky a použitého stroje na vibrace soustavy SNOP* [online]. Ostrava, 2020 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/141308/SMR0033_FS_N2301_2303T002_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y Diplomová práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava.
Vedoucí práce Jiří Kratochvíl.
- [32] LUKS, Tomáš. *Výpočtová analýza namáhání povrchových vrstev pracovního válce při válcování za tepla* [online]. Brno, 2009 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18826
Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Michal Pohanka.
- [33] *Měření drsnosti* [online]. Ivančice: M&B Calibr, b.r. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.mbcaltbr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [34] *Válcování: Metodika stanovení vlivu deformačního tepla na teplotní změny v intenzivně tvářeném materiálu* [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2017 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.fmt.vsb.cz/export/sites/fmt/633/cs/studium/navody-k-cviceni/valcovani/cviceni-9/Valcovani-deformacni-teplo.pdf>
- [35] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012 [cit. 2021-5-11]. ISBN 978-80-248-2533-5. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_obrabeni.pdf
- [36] AK1324 [online]. Studénka: AK1324, c2018 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.ak1324.cz/>
- [37] *Sandvik Coromant* [online]. Praha: Sandvik Coromant, c2021 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/pages/default.aspx>
- [38] *DMG MORI* [online]. Brno: DMG MORI, c2021 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/>
- [39] *Kistler* [online]. Praha: Kistler Group, c2021 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/en/>
- [40] *AHLBORN: Měřicí a regulační technika* [online]. Praha: AHLBORN, c2021 [cit. 2021-5-11].
Dostupné z: <https://www.ahlborm.cz/>
- [41] *HOMMEL-ETAMIC W5* [online]. Teplice: HOMMEL [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: https://www.jenoptik.cz/files/products/mereni-drsnosti-a-profilu-povrchu/produkt_hommel-etamic-w5.pdf
- [42] *DeltaPix: HDMI Microscope Camera* [online]. Smorum: Head Quarter & Sales, c2015 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.deltapix.dk/794-2/>
- [43] *Mitutoyo* [online]. Teplice: Mitutoyo Česko, b.r. [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/index.xhtml>